

RÉPARER LA MOELLE ÉPINIÈRE • LE CHANT À DEUX VOIX • LES MAGNÉTOILES

Pour la Science

■ POUR LA

SCIENCE

Novembre 1999

édition française de
SCIENTIFIC
AMERICAN

*Prédateur
ou charognard ?*

Le tyrannosaure

Canada : \$ 8,75 / Belgique : 277FB / Suisse : 11FS



BLOC-NOTES

de Didier Nordon

5

TRIBUNE DES LECTEURS

6

JEU-CONCOURS

Cosmologie sur un parallépipède

par Pierre Tougne

7



POINT DE VUE

Le créationnisme

par Guillaume Lecointre

8



PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

Le premier bistouri électrique

par Alain Ségal et Jean-Jacques Ferrandis

10



SCIENCE ET GASTRONOMIE

Le soufre et le vin

par Hervé This

12



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

■ Rampe ou enveloppes? ■ Une minimouche
■ Prévention miracle? ■ Glaciers tropicaux

14

■ Chandelles standards ■ Claustrophobie quantique

■ Des hémorragies cérébrales héréditaires

■ Manque de forêts ■ Les fortifications de Nancy

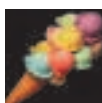


IDÉES DE PHYSIQUE

Le fond de l'air effraie

par Roland Lehoucq

100



VISIONS MATHÉMATIQUES

Les sphéricônes

par Ian Stewart

102



LOGIQUE ET CALCUL

Les propositions indécidables

par Jean-Paul Delahaye

104



ANALYSES DE LIVRES

■ *théories du ciel*, de Michel Cassé

■ *Louis Jurine, chirurgien et naturaliste (1751-1819)*, sous

110

la direction de René Sigrist, Vincent Barras et Marc Ratcliff

■ *Introduction aux études littéraires assistées par ordinateur*,
de Michel Bernard ■ *Les pucerons des plantes maraîchères*
(cycles biologiques et activités de vol), de Maurice Hullé,
Évelyne Turpeau-ait Ighil, Yvon Robert et Yves Monnet

■ *Les pucerons des plantes cultivées. I. Grandes cultures*,
de François Leclant



Chaque mois, retrouvez le sommaire complet
de la revue **en ligne** avec pour chaque article
une bibliographie et un complément d'information

www.pourlascience.com

Sismique et tectonique

28

par Maurice Mattauer

Par la tomographie sismique, les géologues retracent l'enfoncement des plaques dans le manteau et réanalysent la formation des montagnes.

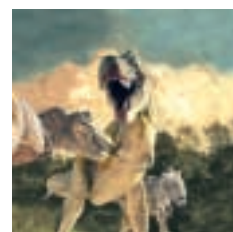


La vie des *Tyrannosaurus rex*

32

par Gregory Erickson

Reprenant l'analyse de fossiles oubliés dans des musées, les paléontologues identifient le comportement des tyrannosaures.



Les dents des tyrannosaures

38

par William Abler

Les dents des tyrannosaures révèlent les habitudes prédatrices et alimentaires de ces animaux.

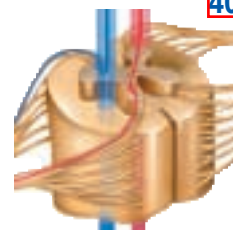


La réparation de la moelle épinière

40

par John McDonald

Des données nouvelles redonnent l'espoir à certaines personnes atteintes de lésions de la moelle épinière.



Le chant des Touvas

50

par Theodore Levin
et Michael Edgerton

En modifiant la morphologie de la gorge et de la bouche, on peut chanter deux mélodies simultanément. Ce chant diphonique est la spécialité des chanteurs du Sud de la Sibérie.



L'enseignement des sciences

60

par Wayt Gibbs et Douglas Fox

Une enquête internationale menée dans une cinquantaine de pays a montré que les lycéens français ont de bons scores en mathématiques. En revanche, ils sont plutôt mal classés en sciences.



Pourquoi les objets se cassent-ils? 68

par Mark Eberhart

Depuis près d'un siècle, les physiciens utilisent la théorie des liaisons chimiques pour prévoir quand un solide se brise ou se déforme. Aujourd'hui, on calcule même le type de dégradation qui se produira.



Les archives climatiques des lacs du Jura

76

par Michel Magny

Les sédiments accumulés dans les lacs du Jura, les glaces du Groenland et les sédiments de l'Atlantique Nord, révèlent les fluctuations du climat.



Les magnétoiles

84

par Kevin Hurley

Depuis 20 ans, des éclairs de rayonnement gamma répétitifs déchirent le ciel. Ce rayonnement émanerait d'étoiles à neutrons à fort champ magnétique et sujettes à des séismes.



Réquisitoire contre les simulations nucléaires

92

par Christopher Paine

Le remplacement des essais nucléaires par des simulations numériques a de nombreux inconvénients.



Les tremblements de terre

L'impossible étant éliminé, enseignait Sherlock Holmes, l'improbable doit être vrai. Ainsi en est-il dans le monde des étoiles. Certains phénomènes contraires aux lois de la physique seraient réputés impossibles, donc inobservables, car nous ne saurions pas interpréter les signaux qui témoigneraient de leur existence ; en revanche, tout ce qui est possible par la physique semble réalisé et observé, aussi improbable et monstrueux soit-il.

Ainsi la mythologie du monde stellaire s'est-elle enrichie de nouveaux êtres fabuleux, les magnétoiles. Ces étoiles à neutrons, de densité faramineuse (un dé à coudre de matière pèse une centaine de millions de tonnes), sont le siège de séismes qui secouent leur surface. Au cours de ces tremblements, les champs magnétiques intenses de ces étoiles (plusieurs milliards de fois celui de la Terre) sont modifiés ; des gerbes d'électrons sont accélérées et émettent un rayonnement que l'on détecte dans l'atmosphère. En mesurant ces rayonnements, les astrophysiciens reconstituent la vie d'une magnétoile (voir *Les magnétoiles*, page 84).

Les séismes terrestres émettent des ondes moins spectaculaires, mais elles sont utilisées pour analyser la structure de l'intérieur du Globe. Une question était posée : que deviennent les plaques de la lithosphère quand elles disparaissent de la surface ? Les mesures de vitesse des ondes engendrées par les séismes ont montré qu'elles ne perdent pas leur identité dans le manteau et qu'elles plongent profondément sur des milliers de kilomètres, jusqu'à la surface du noyau, où doivent s'amonceler des restes de lithosphère ancienne dans un cimetière magnétique, vieux de centaines de millions d'années (voir *Sismique et tectonique*, page 28). Cette découverte aura de formidables répercussions sur notre compréhension des mouvements de la croûte terrestre, notamment sur la formation des montagnes. Pour comprendre le relief terrestre, il ne faut plus regarder en l'air, mais sous nos pieds.

Philippe BOULANGER

L'attention maximale

L'Université de Nancago vient d'avoir une idée – curieuse mais efficace – pour raviver la passion lors des séminaires de recherche. Comme on le sait, ce type de manifestation culturelle ne redoute rien tant que les auditeurs qui, venus par obligation, n'écoutent pas un mot. Ils forment souvent la majorité de l'auditoire, et leur seule présence inerte, ô combien démoralisante, réussit à déstabiliser, voire à rendre ennuyeux, le plus brillant des conférenciers.

Désormais, dans cette université, on ne décide pas d'avance qui va faire l'exposé : on le tire au sort *in extremis*. Chacun est obligé d'être tout le temps prêt. Le stress éprouvé lors de l'incertitude du tirage au sort ôte toute propension à somnoler, et rend donc attentif. Le soulagement met environ une heure à s'installer durablement. Coup de chance, à ce moment-là, l'exposé se termine.

L'électronique et ses bienfaits

Certaines informations sont trop savoureuses pour qu'on se risque à les vérifier avant de s'en faire l'écho. Il serait si douloureux d'avoir à y renoncer... Dans *Visions* (Albin Michel, 1999), le physicien américain Michio Kaku en fournit plusieurs.

En voici une première. «Les cartes de vœux musicales, qui portent des puces sonores jetables, ont plus de puissance informatique que les ordinateurs d'avant 1950.» (P. 51.) Vraie ou fausse, cette petite information contient à elle seule autant d'enseignement que les tragédies antiques :

connaître l'avenir est profondément démoralisant. Imagine-t-on en effet les pionniers de l'informatique persévérer dans leurs efforts s'ils avaient imaginé un seul instant que leur triomphe amènerait la mise sur le marché de cartes capables de brailleur le refrain le plus laid qui ait jamais été composé, *Happy birthday to you* !

Voici une seconde information pleine de saveur : «Au Japon, des toilettes informatisées ont été commercialisées qui sont en mesure de diagnostiquer des problèmes médicaux élémentaires. Le siège de toilette peut prendre le pouls d'une personne par la détection d'infimes pulsations dans les cuisses. L'urine peut être analysée chimiquement pour le diagnostic des diabètes.» Là, un seul mot : bravo ! Le prochain euphémisme à la mode pour nous excuser lorsque nous sommes contraints à un bref isolement, sera : «Je reviens dans un instant. Je dois aller prendre ma tension.» Une question rabelaisienne me préoccupe : comment ces toilettes «intelligentes» détecteront-elles l'absence de visite consécutive à la paresse intestinale ?

Les mathématiciens de la balle

Citation. «Ce graphe est fortement connexe, réflexif, antisymétrique, complet, hamiltonien, eulérien... On peut "valuer" les arcs du graphe, c'est-à-dire associer une mesure à chacun d'eux, une valeur de probabilité par exemple. À tout graphe donné correspond une matrice qui se prêterait bien entendu au calcul matriciel.»

Ce passage n'est évidemment pas tiré d'un ouvrage de mathématiques (quel charme y aurait-il à le citer en ce cas ?) mais de *Jeux, sports et sociétés*, par Pierre

Parlebas (Institut national du sport éditeur, 1999). Il a pour fonction de décrire le jeu de volley-ball – ce que personne ne peut deviner en le lisant, la formalisation ayant ceci de sublime qu'elle fait perdre toute physionomie propre aux phénomènes qu'elle modélise.

Un spécialiste de la théorie des graphes doit-il se mettre au volley pour faire des progrès dans son domaine ? Un volleyeur doit-il étudier les graphes pour améliorer ses performances sportives ? Qu'on démontre que l'une au moins de ces questions admet la réponse oui, et je renoncerais à tenir P. Parlebas pour un auteur pédant !

La formule maléfique

«Chaque formule me fait perdre 5 000 lecteurs», affirment les éditeurs. Si l'évaluation précise varie de l'un à l'autre, le propos, dans son essence, reste le même : les formules dans un ouvrage de vulgarisation scientifique font fuir les acheteurs. Les auteurs sont priés d'y renoncer, et de faire fi de cette réalité : si les scientifiques emploient des formules, ce n'est ni par vice ni par volonté d'être obscurs, mais parce qu'elles sont la meilleure et la plus élégante façon de présenter certains résultats. Privés de ce moyen d'expression, les auteurs sont contraints de se livrer à des contorsions toujours lourdes, souvent confuses.

Le sort subi par ces ouvrages rappelle celui des classiques de la littérature, auxquels on retire, selon les époques et leurs phobies propres, tantôt les passages coquins, tantôt les longues descriptions. Dans tous les cas, les lecteurs voient dénié leur droit à choisir eux-mêmes ce qu'ils veulent sauter. Ils sont pris pour incapables, incultes.

Le problème ne date pas d'aujourd'hui. En 1838, A. Cournot publia ses *Recherches sur les principes mathématiques de la théorie des richesses*. En 1863, l'éditeur, Hachette, n'accepta de rééditer l'ouvrage que si Cournot supprimait toute formule mathématique. Le titre devint : *Principes de la théorie des richesses*, ce qui est beaucoup plus prometteur. Selon Giorgio Israël, qui rapporte ces faits, le corpus ne s'était pas moins appauvri que le titre.

La suppression des formules a-t-elle effectivement permis de mieux vendre ? Je l'ignore. Dommage ! Pour une fois qu'une expérience de ce genre était faite en vraie grandeur...

Les ennemis de l'intérieur

Un débat d'intellectuels (subtils, forcément) sur le rôle et la place de la poésie, sur les tendances actuellement perceptibles... Au cours du débat, un participant déclare d'un ton pénétré : «La question de l'intériorité ressort.»

Jolie balourdise, bien digne de ceux qui «écrivent avec leurs tripes» ! Pourtant, dans cette même veine, la presse ne réussit pas mal non plus. Ainsi, une femme ayant été découverte découpée en morceaux dans une malle et l'enquête policière piétinant, un journal eut ce titre : «Le mystère reste entier.»

Synthétisant ces formules mémorables et voisines, on pourrait en fabriquer une troisième. «À intérieurs sortis, mystères épanouis», par exemple. La formule est obscure ? Bien sûr, mais l'obscurité fait le charme des proverbes. Elle permet de les utiliser à l'appui de tout et de son contraire ; elle leur offre mille possibilités de métamorphoses, ce qui nourrit les interminables disputes entre amis pour savoir quelle forme est authentique. Un peu d'habitude, et nous aurons plaisir à dire comme si cela allait de soi : «À intérieurs sortis, mystères évanouis.»

Quasi-cristaux

Dans l'article «Nouvelles visions des quasi-cristaux» (voir *Pour la Science*, septembre 1999), la démonstration de Petra Gummelt de l'existence d'un recouvrement des pavages de Penrose par une unique pièce décagonale proprement décorée repose sur les propriétés particulières d'un certain type de pavages pentagonaux, ceux dits de Penrose stricts. Elle n'est pas généralisable à des pavages quasi-périodiques quelconques, même pentagonaux. Tout indique au contraire que, compte tenu des propriétés très spécifiques requises pour un recouvrement par un pavé unique, les pavages tridimensionnels réalistes – et, *a fortiori*, les structures atomiques – ne sont pas descriptibles par un unique pavé de recouvrement de taille pas trop grande (pour garder un sens physique plausible). Pour le pavage icosaédrique le plus simple correspondant aux quasi-cristaux réels tridimensionnels (structure icosaédrique de type F), Peter Kramer, l'un des trois auteurs cités dans l'article, identifie déjà au moins deux pavés générateurs.

Sur le fond, l'enjeu est de savoir en quoi la détermination d'un amas atomique prototype de recouvrement unique – à supposer qu'il existe dans les quasi-cristaux réels – pourrait apporter une nouvelle «vision» de ces solides.

Sur le plan descriptif, l'information est faible : certains atomes de l'amas prototype appartenant à deux ou plusieurs amas de façon variable selon la localisation de l'amas considéré, il est impossible de déduire directement la composition et la densité de l'alliage à partir de celles de l'amas : il faut connaître les fréquences d'apparition des divers recouvrements, ce qui revient à remonter dans l'espace à N dimensions. Pour la même raison, il est impossible d'en calculer le spectre de Fourier – calcul pourtant essentiel pour la confrontation des modèles avec l'expérience – sans, à nouveau, faire appel à l'espace de grande dimension. Les «modestes résultats» (sic) sur les structures atomiques des quasi-cristaux obtenus à partir de modèles N -dimensionnels – qui, eux, conduisent directement à toutes ces informations –, constituent les seules données sérieusement quantifiées et confrontables à l'expérience. Plus grave, l'idée selon laquelle la stabilité du quasi-cristal provient de celle de l'amas de recouvrement est intenable. Qui pourrait argumenter que l'énergie d'un cristal est proportionnelle à celle de son motif ? Et, lorsqu'en plus, comme ici, les motifs se recouvrent de façon quasi périodique, il n'existe plus aucun moyen, même qualitatif, d'évaluer l'énergie du solide par rapport à celle du motif isolé.

Reste le problème de la croissance. Les règles de recouvrement des couleurs proposées par Petra Gummelt sont équivalentes aux règles d'incidence des tuiles losanges des pavages de Penrose : construire le pavage avec l'une ou l'autre des méthodes conduites aux mêmes types d'incompatibilités. Un théorème déjà ancien, dû à R. Penrose, stipule qu'il n'y a pas de règles de croissance locales pour ces pavages, et la belle décomposition géométrique de P. Gummelt n'y échappe pas. La compréhension de la croissance quasi cristalline n'est pas seulement une affaire de géométrie, elle passe aussi, et surtout, par une étude de la dynamique des atomes au sein du solide et en front de croissance. Recouvrement ou non, le problème reste entier.

Au total, ces «nouvelles visions des quasi-cristaux» se résument en une propriété géométrique très intéressante des pavages de Penrose stricts, mais l'interprétation physique est contestable.

Denis GRATIAS, L'Hay-les-Roses

Isolationnisme ?

Parce que je suis coupable d'avoir introduit la table à coussin d'air dans l'enseignement de la mécanique, parce que j'ai proposé une méthode pour la découverte expérimentale des lois de conservation, puis de non-conservation de la quantité de mouvement (méthode adoptée par la commission Lagarrigue), je crois utile de réagir à ce propos de Jacques Treiner (voir *Pour la Science*, octobre 1999) : «Ainsi, la célèbre table à coussin d'air permet de se placer dans une situation qui n'existe jamais dans le monde réel, à savoir un monde sans frottements.»

Jacques Treiner n'a-t-il jamais connu le verglas ? N'a-t-il jamais lancé un caillou sur la glace d'un étang gelé et observé alors la loi d'inertie (presque ! Mais, en physique, c'est toujours presque !)?

Elevons le débat. Le monde réel met en jeu une telle multiplicité d'interactions qu'il ne peut être étudié qu'en entourant une partie de ce monde, appelée système, par une enceinte isolante interdisant les interactions autres que celles que l'on veut étudier expérimentalement. Par exemple : l'étude de l'interaction thermique entre deux corps nécessite leur enveloppement par une enceinte adiabatique réalisée approximativement avec le calorimètre. Faudrait-il exclure le calorimètre de l'enseignement sous prétexte qu'il n'existe pas de paroi adiabatique dans le monde réel ? Faudrait-il interdire les «fils électriques» dont l'isolement est imparfait dans

un monde réel ? La physique expérimentale utilise une multitude de parois approximativement imperméables à diverses grandeurs extensives : notre table à coussin d'air crée une situation dans laquelle un mobile est protégé – approximativement – d'un apport de quantité de mouvement. Dans un premier temps, on ne comprend pas comment fonctionne une paroi isolante (la paroi du calorimètre, la table à coussin d'air, etc.), mais cette paroi permet d'établir certaines lois de la physique. Réciproquement, les lois ainsi établies permettent de comprendre le fonctionnement de la paroi et de permettre le perfectionnement de cette paroi. La paroi perfectionnée est alors utilisée pour améliorer notre connaissance des lois de la physique, laquelle progresse ainsi par allers et retours entre lois fondamentales et technologie. Les élèves doivent comprendre cela !

Se satisfait-on d'un retour à la machine d'Atwood et de l'assimilation à un point matériel unique de l'ensemble de deux masses réunies par un fil passant sur une poulie ?

(La suite de la lettre est disponible sur le site Web www.pourlascience.com)

Pierre PROVOST, Clamart

Outrage !

J'ai été outré par le ridicule achevé de vos articles concernant l'évolution, et tout particulièrement la fable monumentale qui veut faire croire aux gens qu'ils ont pour grand-père un singe, pour arrière-grand-père un oursin, pour grand-mère une guenon... Cela sans aucune probité intellectuelle, vertu première et indispensable de tout homme, surtout s'il se prétend «homme de science». En effet, vous avez publié un numéro démentiel sur la «préhistoire». On a trouvé, dites-vous, des traces de pas sur une boue solidifiée, et vous en déduisez que ces traces sont celles d'êtres humains – ou pré-humains – qui sont passés par là il y a plusieurs dizaines, voire centaines de millénaires... Vous n'en savez strictement rien. Vous êtes encore prisonniers du canular fantastique qu'a inventé l'abbé Breuil, le peintre des «grottes de Lascaux», grâce auxquelles il a convaincu de sottise tous les paléontologues du monde...

Abbé Joseph GRUMEL

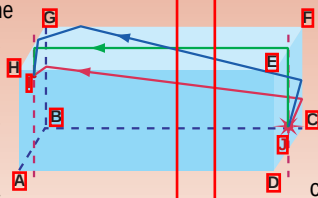
Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science. L'adresse de *Pour la Science* sur Internet est : tribune@pourlascience.fr.

JEU-CONCOURS N° 65

PIERRE TOUGNE

Cosmologie sur un parallélépipède

Dans un univers imaginaire, Flatland, les êtres sont à deux dimensions et s'interrogent sur la physique dans un tel univers. Je vous emmène dans un univers qui est la surface d'un parallélépipède rectangle. Un astronome *I*, situé sur l'axe de symétrie vertical de la face *ABGH* à 2 400 000 kilomètres au-dessus du centre de cette face, observe l'unique étoile *J*, de cet univers, elle-même située sur l'axe de symétrie vertical de la face *CDEF* à 2 400 000 kilomètres au-dessus du centre de la face (voir la figure).



Il constate qu'il voit cette étoile dans huit directions différentes et que la lumière met 65 secondes pour lui parvenir. Dans cet univers comme dans le nôtre, la lumière se propage à 300 000 kilomètres par seconde, en suivant le chemin le plus court entre deux points. Quelles sont les longueurs des côtés de ce parallélépipède ?

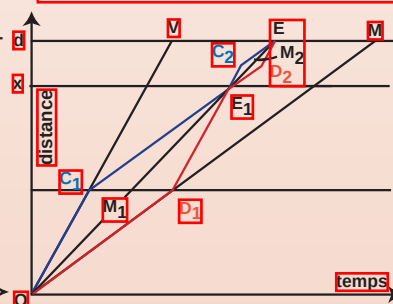
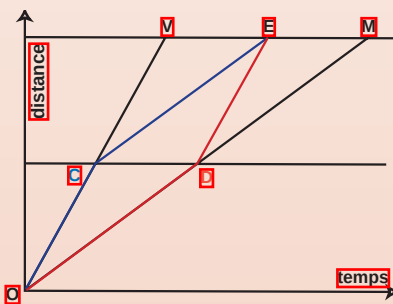
Envoyez vos réponses aux questions à Pour la Science, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois de novembre 1999, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 63

«An n'importe quelle distance entre *O* et 30 kilomètres de la ville *B* ! » Les valeurs numériques n'ayant pas d'importance, nous raisonnerons avec une distance *d* et des vitesses *v_c* (cycliste) et *v_m* (marcheur), avec *v_c* > *v_m*. Représentons le parcours de chaque promeneur sur un graphique ayant le temps en abscisse et la distance parcourue en ordonnée. Un promeneur effectuant tout le trajet à bicyclette est représenté par le segment *OV*, de pente *v_c* ; de même pour le marcheur, c'est le segment *OM*, de pente *v_m*. Les parcours réels de chacun des promeneurs seront une succession de segments de droite parallèles, respectivement à *OV* s'il est à bicyclette et à *OM* s'il marche, compris à l'intérieur du triangle *OVM* et se terminant en un point *E* de *VM*, car ils arrivent simultanément à la ville *B*. Dans le cas d'un seul échange de la bicyclette, les parcours des deux promeneurs sont les côtés d'un parallélogramme de sommets opposés *O* et *E* et de côtés parallèles à *OM* et à *OV*, donc à mi-distance *d/2* en *C* et *D*. Ainsi, le promeneur commençant à bicyclette (en bleu) va de *O* en *C*, où il laisse la bicyclette, puis

de *C* à *E* en marchant, tandis que l'autre promeneur (en rouge) marche de *O* à *D*, où il trouve la bicyclette et termine le trajet *DE* à bicyclette (voir la figure 1).

Supposons maintenant que le dernier échange a eu lieu à une distance *x* comprise entre *d/2* et *d* et, pour simplifier, que les deux promeneurs ne se sont croisés qu'une seule fois (la généralisation est laissée au soin du lecteur). Soit *M₂* le point de *OE* d'ordonnée *x*. Au moment du croisement, on se retrouve dans la situation de la figure 1, mais avec comme origine le point de croisement *E₁*, qui n'est autre que le symétrique de *E* par rapport à *M₂* (on justifie a posteriori que *x* > *d/2*, car, dans le cas contraire, *E₁* ne serait plus entre *O* et *E*), et les parcours des deux promeneurs entre *E₁* et *E* est le parallélogramme *E₁D₂EC₂* (voir la figure 2). *E₁* étant le seul croisement depuis le départ de *O*, le trajet des deux promeneurs est le parallélogramme ayant pour sommets opposés *O* et *E₁* et des côtés parallèles à *OV* et *OM*, que l'on construit en prenant le milieu *M₁* de *OE₁*, *C₁* et *D₁* étant l'intersection de l'horizontale passant par *M₁* avec *OV* et *OM*.





Le créationnisme

GUILLAUME LECOINTRE

Les créationnistes frappent fort au Kansas. En France, l'influence de la pensée créationniste est limitée, car l'éducation nationale, laïque, n'est pas soumise aux puissances d'argent.

L'État du Kansas vient de décider que la théorie de l'évolution ne devrait plus faire l'objet d'examen dans les écoles publiques. Cette décision montre la vitalité des créationnistes américains, mais les Australiens ne sont pas en reste...

Depuis 14 ans, le géologue australien Ian Plimer se bat contre les créationnistes de son pays. Après six années de procès, il est au bord de la banqueroute. En 1997, les radios et journaux se sont fait l'écho d'un procès opposant I. Plimer aux créationnistes, mais ils n'ont pas suivi l'affaire sur le long terme. En fait, la bataille continue... Car, qu'ils soient d'Australie ou du Kansas, les créationnistes pratiquent le harcèlement permanent des structures ayant pouvoir de décision en matière d'éducation.

Qui sont ces créationnistes ? Les créationnistes issus du fondamentalisme protestant sont attachés à une lecture littérale de la genèse biblique. Leur discours sur le monde et son origine s'est longtemps construit contre la science, ce qui limitait leur respectabilité. D'où un changement de stratégie : les créationnistes modernes ne s'opposent plus à la science, mais, au contraire, entendent gagner leur crédibilité auprès d'un public naïf ou désinformé en se prétendant eux-mêmes scientifiques. Ils ont donc inventé le « créationnisme scientifique » pour combattre la science sur son propre terrain, trouver et promouvoir des « preuves » scientifiques de l'interprétation littérale de la genèse biblique. Ainsi la Terre n'aurait que 6 000 ans et les fossiles seraient expliqués par le déluge. Deux siècles de géologie et de paléontologie sont réinterprétés de fond en comble, et la biologie évolutionniste niée, de manière que la Bible soit « scientifiquement prouvée ». Aux États-Unis, les créationnistes ont depuis 25 ans leurs instituts de recherches, leurs chercheurs qui publient dans leurs journaux et délivrent leurs doctorats, leurs musées, etc. La science est donc imitée dans tous ses détails.

En Australie, le poids politique et économique des créationnistes (via la

Creation Science Foundation) est sans commune mesure avec le créationnisme européen. C'est le pays où le médecin Michael Denton publia en 1985 un livre truffé de bêtises, *Evolution, a theory in Crisis*, qui, inexplicablement, trouva des éditeurs français pour sa traduction. Leur activisme est tel qu'au début des années 1980, l'État du Queensland autorisa l'enseignement du créationnisme en tant que science dans les écoles.

I. Plimer, professeur de géologie à l'Université de Melbourne, refuse de laisser les créationnistes s'infiltrer dans le système éducatif de son pays. Il a prouvé, au cours de six années de procès incessants, que les créationnistes australiens étaient coupables de fraude scientifique et financière. En Australie, les avocats sont payés sans budget ni limitation de durée tant que le procès se poursuit. Les fondamentalistes sont soutenus financièrement par une activité commerciale intense de cassettes vidéo et audio, de livres, et d'autres supports de leur message sectaire. Ils utilisent toutes les tactiques légales en vue de retarder et d'empêcher l'action en justice d'apparaître à la cour, afin d'essouffler financièrement leur ennemi. I. Plimer a déjà dû vendre sa maison pour continuer les procès.

Malgré une campagne publique de soutien qui recueillit 200 000 dollars en 1997, malgré un procès gagné, malgré une reconnaissance internationale (I. Plimer a reçu des sociétés géologiques anglaises et allemandes le prix Eureka en 1995), I. Plimer reste écrasé de dettes : il doit encore 380 000 dollars de frais de justice. Sans parler de la fatigue (il maintient son activité universitaire) et des pressions, insultes, menaces de mort... L'Association *La Libre Pensée* relaye aujourd'hui une campagne de solidarité en faveur de Ian Plimer qui se bat pour la laïcité dans son pays (compte Ian Plimer, *Bayrische Hypo und Vereinsbank AG*, Stiglmaierplatz, 80311 München ; code banque 700 202 70 ; numéro de compte 41919612).

En France, l'attitude la plus courante face au créationnisme est l'amusement. On se croit à l'abri, on ne voit aucune raison de s'inquiéter. Il est vrai que la théorie de l'évolution est au programme des collèges et des lycées, qu'elle constitue des sujets de baccalauréat. Il est vrai que les programmes scolaires sont décidés de manière centralisée, ce qui les préserve, dans une certaine mesure, de l'activisme antidarwinien. Il est vrai que la laïcité française, même si elle s'use, reste un facteur culturel qui priverait un courant créationniste vraiment offensif de toute représentation dans l'opinion.

Cependant, on ignore que le créationnisme gagne lentement dans la sphère privée. Des tracts et des documents sont distribués par des religieux à la périphérie des collèges et des lycées, afin de « rectifier » les cours de biologie. Des cassettes vidéo créationnistes, fabriquées aux Pays-Bas, circulent dans certains lycées. Des communes ouvrent leurs salles culturelles à des conférenciers créationnistes. Diverses associations tiennent des propos très clairement créationnistes, d'idéologie intégriste catholique. On ignore peut-être que la *Creation Research Society*, créée en 1963 aux États-Unis, est plus que jamais un puissant moteur de l'extension du créationnisme sur tous les continents. Que les profits que les créationnistes tirent de leur commerce en Australie ou aux États-Unis servent à leur expansion, y compris en Europe. La Suisse hébergea en 1984 le premier congrès européen créationniste. La Suède ouvrit le premier musée créationniste à Umea en 1996. L'infiltration créationniste en France est peut-être plus lente qu'ailleurs, mais elle ne peut être complètement étrangère aux puissants moyens financiers dont jouit le créationnisme à l'étranger.

Guillaume LECOINTRE est biologiste au Muséum national d'histoire naturelle de Paris.



Le premier bistouri électrique

ALAIN SÉGAL • JEAN-JACQUES FERRANDIS

Bistouri à température élevée et cautérisant les plaies à température inférieure, le couteau d'Eugène de Séré fut une remarquable application chirurgicale du courant produit par une pile.

Comment arrêter une hémorragie ? Comment éliminer polypes ou tumeurs sans déclencher une hémorragie à l'endroit de la plaie ? Pour faire cesser une hémorragie, les «barbiers-chirurgiens» ont longtemps appliqué sur les plaies des cautères, plaques métalliques de formes diverses qu'ils chauffaient à blanc dans des braises activées par un soufflet.

La découverte des piles et de l'échauffement des métaux traversés par un courant électrique ont fait germer dans l'imagination de divers médecins l'idée d'utiliser le courant électrique pour cautériser les plaies. Lorsqu'Eugène de Séré, né en 1828, entreprend ses études de médecine, le niveau de l'enseignement est excellent. C'est la période faste de la méthode anatomo-clinique, et l'enseignement des sciences complémentaires, telles la physique, la chimie et l'histoire naturelle sert de ferment pour l'invention et la mise au point d'un instrument qui allait connaître un succès notable : le bistouri galvano-caustique.

Le 12 août 1853, Eugène de Séré obtient son doctorat de médecine. Il s'engage comme médecin aide-major stagiaire à l'École impériale de médecine et de pharmacie militaires du Val-de-Grâce. Le 17 juillet 1854, il s'embarque pour la guerre de Crimée, où le choléra et le scorbut font des ravages. Le Service de santé perd 90 pour cent de ses effectifs. À son retour, il reçoit la médaille militaire, mais se trouve bientôt confronté à la courtoisie, mais terrible, Campagne d'Italie, qui met en relief l'inadaptation des services de santé à des combats meurtriers. Les ambulances de campagne et les hôpitaux sont débordés, le personnel médical est insuffisant : on ne compte pas plus d'un médecin pour 1 000 hommes.

Selon le chirurgien des armées Edmond Delorme (1847-1929) : «Cette guerre d'Italie montra, d'une façon plus

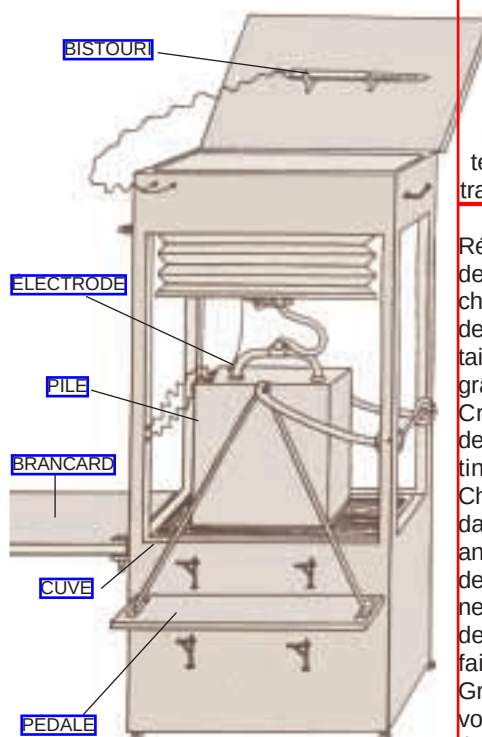
éclatante encore que la guerre de Crimée, les vices d'un système qui consistait à abandonner la direction du personnel, du matériel du Service de santé des armées et l'hospitalisation des malades et des blessés à des autorités étrangères aux choses médicales.» La démonstration de l'incapacité du service de l'intendance à assurer le ravitaillement sanitaire est faite lorsqu'on apprend que, le 22 juillet 1859, 1 800 colis, 1 900 kilogrammes de pansements, 3 000 lots complets d'hôpitaux, 2 caissons d'ambulance,

25 cantines de bataillon qui encombraient le port de Gênes repartent pour la France sans avoir été ouverts.

À son retour, de Séré est attaché à l'hôpital militaire de Vincennes ; ensuite, il est affecté, à Antibes, à la Légion franco-romaine, qui fait partie des troupes pontificales, puis à Beauvais, pour y poursuivre des «expériences sur des bains électriques». Ces dernières, qui commencent en 1858, ont pour objet l'application de «l'électricité à la thérapeutique médicale». Depuis les travaux de Luigi Galvani et d'Alexandro Volta, certains médecins s'intéressent aux perspectives thérapeutiques offertes par le courant délivré par les piles. Les uns veulent l'utiliser comme traitement de diverses pathologies, les autres s'intéressent à l'échauffement des métaux traversés par un courant électrique.

Au début du XIX^e siècle, Anthelme Récamier, à l'Hôtel-Dieu de Paris, essaie de détruire un cancer de l'utérus par la chaleur. En 1843, à Vienne, Moritz Heider s'emploie à cautériser la pulpe dentaire avec un fil de platine chauffé à blanc grâce à un courant électrique. En 1846, Crusell de Wiborgsk tente de couper des tissus biologiques avec un fil de platine chauffé par un courant. En 1849, Charles Sédillot, à Strasbourg, se lance dans l'aventure en opérant des fistules anales. En 1854, Albrecht Theodor Middeldorf utilise un fil de platine pour éliminer une tumeur nasale. Cette utilisation de fils de platine chauffés à l'électricité fait le tour de l'Europe, mais la pile de Grove utilisée pour fournir le courant est volumineuse et très onéreuse, et la quantité de platine requise quasi rédhibitoire.

C'est alors que Middeldorf vient à Paris sous l'égide de Paul Broca, fort intéressé par les ressources de l'électricité. C'est à Broca et à Eugène de Séré que l'on doit les améliorations qui rendront le dispositif réellement utilisable. Ils préconisent l'emploi de la pile de l'ingénieur Grenet,



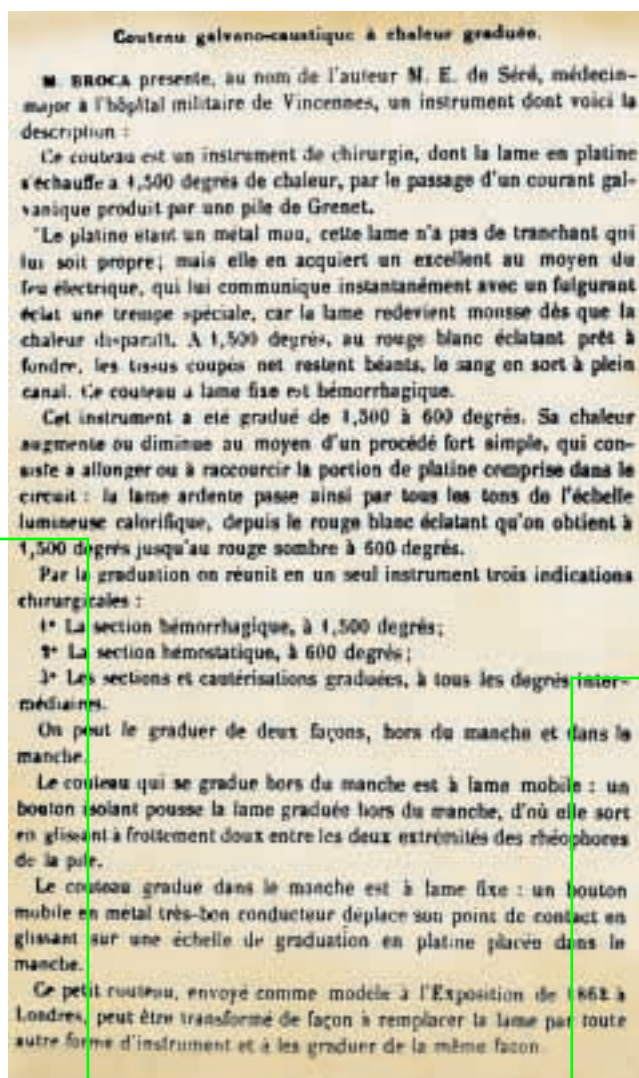
Eugène de Séré alimente le bistouri (en haut), au moyen d'une pile de Grenet placée dans un coffrage. Grâce à une pédale, le chirurgien remonte plus ou moins les électrodes afin d'ajuster le courant à la température souhaitée pour le bistouri. Sur le côté, des crochets servent à recevoir un brancard : on opère ainsi un grand blessé sans avoir à le déplacer.

moins chère et moins encombrante. Auguste Nélaton, chirurgien de l'Empereur, est conquis par le couteau d'Eugène de Séré. Il l'essaie dès 1860, d'abord sur un cadavre, puis sur un malade ayant un cancer récidivant du bras. La résection de la tumeur est parfaite, mais la température étant élevée, le couteau est très tranchant, et de Séré craint les risques d'hémorragie. Sa crainte est fondée : aussi de Séré imagine-t-il un dispositif qui lui permet d'ajuster la température et, par là-même, de transformer le bistouri tranchant en un cautère.

Grâce à trois réglages indépendants, la pile de Grenet à insufflation assure l'obtention d'un courant d'intensité variable. D'une part, la pile est équipée d'un soufflet qui injecte de l'air dans le liquide de la pile. Quand on actionne le soufflet, le contenu de la cuve de 50 litres est homogénéisé et l'intensité du courant produit augmente. D'autre part, le courant varie selon la hauteur de zinc qui est immergée dans le liquide : quand on soulève les plaques de zinc, l'intensité du courant diminue. De Séré imagine une pédale qui permet au chirurgien en cours d'opération de régler l'intensité avec le pied. Enfin, dans le couteau lui-même, une sorte de rhéostat affine le réglage de la température, c'est-à-dire de l'effet recherché (section ou coagulation).

CAUTÈRE ET BISTOURI

Le 23 mars 1863, de Séré présente son couteau galvano-caustique à l'Académie des Sciences, et Paul Broca le fera devant la Société impériale de chirurgie en février 1866 (voir le *compte rendu ci-dessus*). La principale innovation de cet instrument est sa température ajustable de 600 à 1 500 °C. Quel est l'intérêt de faire varier la température du couteau ? Le tranchant du couteau en platine change en fonction de la température : «mousse» ou «éponge» de platine à basse température, il devient très tranchant et d'un blanc éblouissant à haute température (il fond à 1 750 °C). Or les chirurgiens savaient déjà que la température recommandée pour cautériser les plaies est de l'ordre de 600 °C : à cette température, le couteau d'Eugène de Séré sert de cautère. Au contraire, vers 1 500 °C, le couteau



ne cautérise plus, mais il devient un bistouri extrêmement acéré. Pour sectionner les polypes ou les tumeurs difficiles à atteindre avec le couteau, de Séré remplace le couteau par une «anse coupante», une sorte de lasso dont la température, comme celle du bistouri, peut varier de 600 à 1 500 °C. Quand le fil est épais ou que plusieurs brins sont tressés, l'effet de coagulation est favorisé ; quand le brin est fin, c'est l'effet de section qui prédomine. Toutefois, lorsqu'il est très chaud, un fil de platine se rompt facilement.

Le couteau de de Séré est rapidement reconnu par les chirurgiens comme une innovation importante. Il est décrit dans l'*Arsenal de la chirurgie contem-*

poraine qu'Emile Spillmann, médecin au Val-de-Grâce, publie en 1872. Toutefois, Eugène de Séré ne verra pas la consécration de son instrument, car il meurt le 30 août 1870 : la France a déclaré la guerre à la Prusse le 18 juillet 1870, et l'infirmerie où a été affecté de Séré se trouve près de Mouzon, à portée de canon des troupes prussiennes ; lors d'une attaque, il est tué d'une balle en pleine poitrine, alors qu'il soigne les blessés dans l'infirmerie. L'armée française, commandée par Napoléon III et par Mac Mahon, encerclée dans la cuvette de Sedan, est contrainte à la capitulation le 2 septembre 1870.

DE LA PILE AU LASER

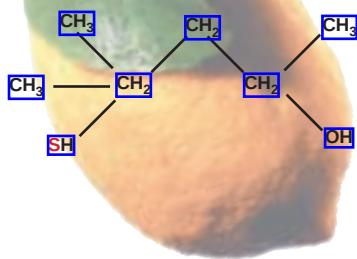
Si le principe de la température variable est conservé dans les bistouris qui suivent celui de de Séré, l'alimentation électrique est notablement perfectionnée : d'abord grâce aux recherches de Nikola Tesla sur les courants de haute fréquence, puis grâce à celles de Jacques Arsène d'Arsonval qui étudie les propriétés biologiques de ces courants de haute fréquence, désormais maîtrisés. L'Américain W. Bovie utilise le premier des lampes TSF, qui assurent notamment une intensité maximale moins élevée, de sorte que les tissus sont détruits sur une plus faible épaisseur. Dans le bistouri de de Séré, à basse température, c'est la coagulation des protéines qui est l'effet biologique prédominant, tandis qu'à température élevée, les tissus sont vaporisés.

L'obtention d'un courant de haute fréquence stable et la maîtrise de la pénétration du bistouri ont été les deux améliorations les plus notables apportées au bistouri de de Séré. Aujourd'hui, les chirurgiens qui expérimentent les bistouris à laser sont confrontés aux mêmes difficultés que les chirurgiens du XIX^e siècle qui découvraient les applications médicales de l'électricité : maîtriser la profondeur d'attaque et l'échauffement des tissus.

Alain SÉGAL est médecin et secrétaire général de la Société française d'histoire de la médecine. Jean-Jacques FERRANDIS est médecin en chef au Val-de-Grâce et conservateur du musée du Service des armées.

A. SÉGAL, *Le bistouri électrique*, in *Acta endoscopica*, vol. 18, n° 3, pp. 219-228, 1988.

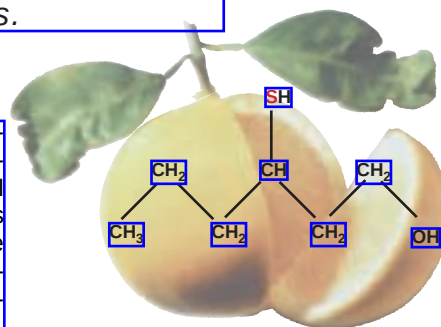
A. SÉGAL et J.-J. FERRANDIS, *Eugène de Séré (1828-1870) inventeur du bistouri électrique*, in *Histoire des sciences médicales*, tome 23, n° 3, pp. 255-264, 1998.



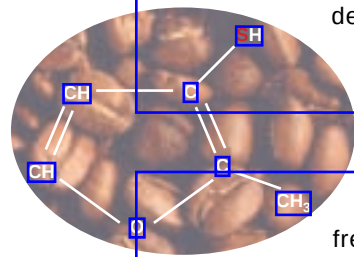
Le soufre et le vin

HERVÉ THIS

Les composés soufrés des vins sont, selon les molécules, responsables de défauts ou de qualités.



Le soufre dans les vins est-il toujours un défaut ? Dans les années 1960, les excès de certains vignerons soucieux de la bonne conservation de leurs produits ont donné aux molécules soufrées une réputation... sulfureuse : le dioxyde de soufre ajouté en trop grande quantité lors du méchage des tonneaux ou du sulfitage des vendanges provoque de douloureux maux de tête. Toutefois les études biochimiques récentes montrent que le soufre n'est pas à rejeter en bloc : à la Faculté d'œnologie de Bordeaux, des chimistes découvrent que le soufre est capable du pire comme du meilleur, que si quelques molécules soufrées sont responsables de nets défauts, d'autres contribuent aux notes de buis, de genêt, de fruit de la passion, de pamplemousse, etc. dans divers vins blancs ou rouges.



L'œnologie n'a longtemps vu des composés soufrés que leur face Mr Hyde : il est vrai que l'hydrogène sulfuré ou le dioxyde de soufre sont nauséabonds. D'autres molécules soufrées étaient-elles responsables de ces défauts ? Leur identification, qui semblait être la clé d'une modification des méthodes de fermentation ou d'élevage des vins, a débouché sur la découverte de la face Dr Jeckyll. C'est ainsi qu'en 1993, Philippe Darriet et Denis Dubourdieu découvrirent dans les vins de Sauvignon une molécule d'arôme agréable, appartenant à la famille des thiols (avec un groupe composé d'un atome de soufre et d'un atome d'hydrogène -SH, lié à un des atomes de carbone de la molécule). D'autres composés soufrés contribuaient-ils à l'arôme des vins de Bordeaux ? Takotoshi Tominaga, Valérie Lavigne-Cruege et Patricia Bouchilloux ont mis au point des méthodes d'analyse qui révèlent des composés soufrés présents en concentrations très faibles.

Nombre de molécules soufrées trouvées sont encore des thiols, aromatiquement très actifs : alors que le seuil de perception des alcools (des molécules avec un groupe hydroxyle -OH) est de l'ordre du milligramme ou du microgramme par litre, celui des thiols correspondants est environ 1 000 fois inférieur. D'où l'intérêt de la méthode d'analyse, qui détecte ces «arômes traces», utiles ou nuisibles.

Au total, les études ont montré que beaucoup de composés soufrés volatils responsables de défauts aromatiques dans les vins ont pour origine l'activité ou le métabolisme des levures : au cours de la fermentation alcoolique, ces dernières transforment les acides aminés soufrés du raisin, ainsi que le dioxyde de soufre ajouté pour la conservation.

La connaissance évite-t-elle le défaut ? S'il est assez aisé de diminuer la concentration en hydrogène sulfuré, en réduisant l'apport de dioxyde de soufre ou en soutirant le vin afin de l'aérer, d'autres molécules telles que l'éthanethiol, le méthaneethiol et une autre molécule voisine, le méthionol, semblaient plus difficiles à juguler. Les chimistes ont observé que la concentration en ces composés dépend directement de la turbidité des jus de raisins avant la fermentation alcoolique ; cette turbidité, qui met le jus en contact avec les levures, devra être réduite.

L'exploration du bon côté des molécules soufrées a également donné une moisson de résultats... attendue : on savait que certains thiols participent à l'arôme caractéristique de plantes (genêt, buis), de fruits (cassis, pamplemousse, fruit de la passion, goyave, papaye...), voire d'aliments tels que viande grillée ou café. Or les vins de Sauvignon, qui présentent une grande variété de nuances aromatiques, perdent leurs arômes quand du cuivre est additionné au vin : comme le cuivre se lie chimiquement aux thiols et bloque leur action aromatique, les chimistes soupçonnaient que des thiols étaient également responsables d'arômes des vins.

Le premier thiol identifié en 1993 dans les vins de Sauvignon avait une odeur

de buis ou de genêt, à partir d'une concentration de 40 nanogrammes par litre ; les chimistes bordelais l'ont maintenant retrouvé dans le buis et dans le genêt. Puis, étudiant les vins blancs, ils ont trouvé d'autres molécules qui étaient également présentes dans des fruits : par exemple, le 3-mercaptopentyl-acétate, à nuance dominante de buis, rappelle aussi le zeste de pamplemousse et le fruit de la passion, où on l'a retrouvé ; un autre thiol qui a, selon les environnements chimiques, une odeur de pamplemousse ou de fruit de la passion, a également été trouvé dans ces derniers.

Et dans les vins rouges ? Là encore, les chimistes se sont fondés sur une observation de dégustation : l'intensité des arômes fruités, viandés, et la complexité de l'arôme des vins rouges jeunes de Merlot et de Cabernet Sauvignon diminuent quand les vins contiennent une petite quantité de cuivre. De fait, plusieurs thiols trouvés dans les vins de Sauvignon, ont été récemment identifiés dans les vins jeunes de Merlot, de Cabernet Sauvignon et de Cabernet franc : ils contribuent aux notes de fruits cuits, de cassis, de viande, de café..., à des concentrations aussi faibles que 0,1 nanogramme par litre !

Sur la base de ces découvertes, les œnologues cherchent aujourd'hui à optimiser l'élevage des vins. Ils savent notamment que la conservation des vins blancs sur les lies, où reposent les molécules soufrées des levures, augmente progressivement les concentrations en certains thiols aromatiques.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 29 novembre 1999, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Rampe ou enveloppes ?

De nouvelles hypothèses remettent en cause l'utilisation de rampes pour la construction des pyramides d'Égypte.

Vous êtes l'architecte du pharaon Khéops et, il souhaite pour tombeau la plus grande pyramide jamais construite. Ses désirs étant des ordres divins – votre tête est en jeu – vous convoquez aussitôt votre cabinet d'étude pour réfléchir au problème. Comment peut-on assembler des milliers de blocs de calcaire de 2,5 tonnes et 90 blocs de granit de 25 tonnes ?

Les égyptologues se perdent encore en conjectures sur les méthodes des architectes égyptiens. Deux écoles s'opposent. La plus répandue propose la construction d'une rampe inclinée progressivement rehaussée et prolongée, sur laquelle des hommes tiraient les blocs de pierre. Selon la deuxième, des machines en bois utilisant le principe du levier hissaient les blocs de pierre d'une

couche horizontale à l'autre. Parmi les tenants de la thèse «machiniste», l'architecte Pierre Crozat a récemment proposé un système en accord avec les écrits de l'historien grec Hérodote (–484 ; –420).

Les partisans des rampes se réfèrent aux textes de Diodore de Sicile (premier siècle avant notre ère). La plus répandue des théories «rampistes» est due à l'égyptologue français Jean-Philippe Lauer qui indique qu'une rampe frontale rectiligne est le système d'érection de la pyramide de Khéops le plus probable (voir la figure). Ses détracteurs opposent le gigantisme nécessaire de cette rampe. En 1983, l'égyptologue Georges Goyon a proposé une rampe hélicoïdale qui enveloppe la pyramide à mesure qu'elle croît. Le volume de cette rampe, qui bénéficie de l'appui de la pyramide, est plus petit que celui de la rampe frontale. Néanmoins, le millier d'hommes nécessaire pour tracter un bloc de 25 tonnes devait manœuvrer difficilement dans les virages à angle droit.

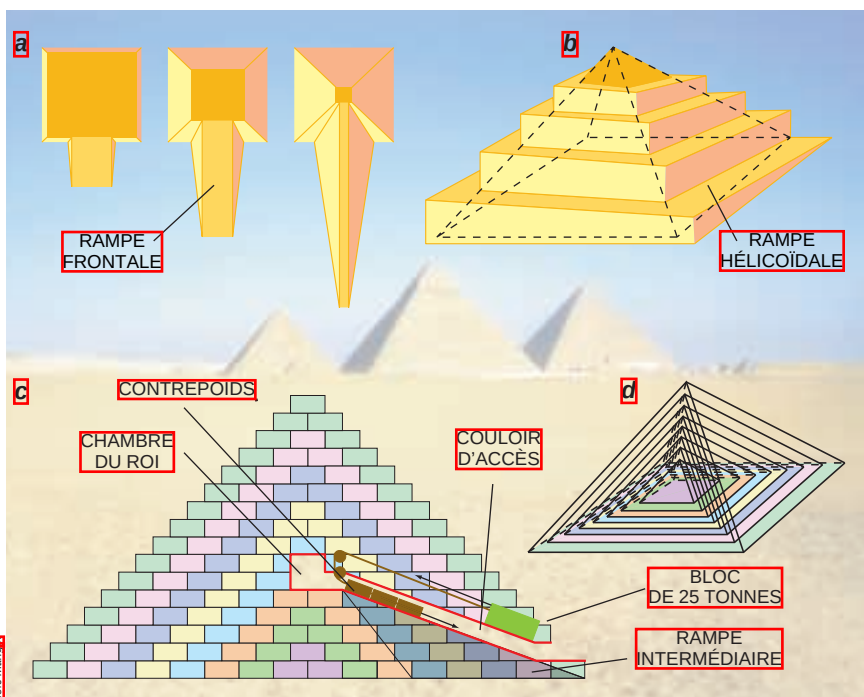
Hérodote évoque, dans *Histoires II*, des pierres utilisées tantôt comme *krossaï*, c'est-à-dire, en grec, des pierres en surplomb qui dépassent de celles sur lesquelles elle sont posées, tantôt comme

bomides, des pierres d'appui. Ces pierres étaient soulevées par des leviers de bois. P. Crozat a reexaminé ce texte et observé l'agencement des blocs rocheux au sommet et sur les arêtes endommagées de la pyramide de Khéops. Il propose que la pyramide a été construite par juxtaposition d'enveloppes successives (voir c et d sur la figure) : une petite pyramide a été recouverte d'une couche de pierres pour former une nouvelle pyramide un peu plus grande ; puis une nouvelle couche uniforme a été ajoutée à la manière des enveloppes successives d'un oignon. D'une pyramide de cinq blocs (un bloc posé au-dessus de quatre autres arrangés en carré), on construit par ce système récurrent une pyramide qui atteindra, par exemple, les 147 mètres de hauteur de la pyramide de Khéops. Lorsqu'une pierre est soulevée et posée, elle sert d'appui pour la suivante.

Cette théorie expliquerait aussi la construction des couloirs internes qui mènent à la Grande galerie, à la chambre du roi et à la chambre de la reine : sur un côté d'une pyramide intermédiaire (la pyramide orange de la figure c), des ébauches des futures enveloppes sont construites de moins en moins hautes (les blocs sombres de la figure c). Elles créent ainsi une rampe qui devient le plancher du couloir d'accès, lorsque les enveloppes rocheuses sont complétées. Selon P. Crozat, des contrepoids qui glissaient dans cette galerie hissaient les blocs de granit de 25 tonnes. Placés au-dessus de la chambre du roi, ces blocs répartissent la pression exercée par le haut de la pyramide et évitent ainsi l'écrasement de la chambre. Une fois tous les blocs de granit hissés, les contrepoids ont été laissés en place pour obstruer le couloir.

Une vue aérienne du plateau de Gizeh montre que chacune des pyramides est située dans une dépression. De ce constat, ainsi que de la concordance d'orientation de la pyramide avec les fracturations du sol, qui suivent l'une des diagonales, l'architecte propose que les pierres des pyramides ont été prélevées sur le lieu même des constructions. De la même manière que la terre retirée pour creuser un fossé forme un talus à proximité, les pierres ont été prélevées et taillées sur le site de la pyramide.

Depuis 4 500 ans, les pyramides d'Égypte gardent le secret de leur construction et défient la sagacité des historiens. La question a-t-elle enfin sa réponse ?



Selon certains égyptologues, une rampe a été utilisée pour hisser les pierres d'une couche à une autre : elle a pu être frontale (la figure a montre trois étapes de la construction) ou hélicoïdale (b). Pierre Crozat propose un système où, par un mécanisme récurrent, une pyramide est progressivement enveloppée de couches régulières de pierres (c et d). Cette hypothèse permet la construction d'une rampe intermédiaire (blocs foncés de la figure c) qui devient, lorsque les enveloppes rocheuses sont complétées, le plancher du couloir d'accès. Dans celui-ci, des contrepoids (en marron) glissaient pour hisser des blocs de 25 tonnes (en vert).

Une minimouche

La mutation d'un gène montre que la croissance et la prolifération cellulaire sont indépendantes.

Chez certaines espèces de fourmis, lorsqu'une colonie devient trop importante, elle se scinde en deux et chacun des groupes prend possession d'un nouveau domaine. Cependant, en deçà d'un nombre critique d'individus, le groupe reste uni. Après des expériences sur les levures, les biologistes pensaient que toutes les cellules ont un comportement similaire : elles déclenchent le processus de division, nommée mitose, seulement après avoir atteint une taille critique. Or, Jacques Montagne, de l'Institut Friedrich Miescher, à Bâle, a montré que l'absence d'une protéine, nommée S6 kinase, déclenche, chez la drosophile, la division des cellules avant qu'elles n'aient la taille normale : les mécanismes de croissance et de division sont indépendants, l'un pouvant être perturbé sans que l'autre le soit.

La S6 kinase, présente également chez les mammifères, est une enzyme qui active la synthèse des ribosomes, c'est-à-dire des petits éléments cellulaires qui fabriquent toutes les protéines nécessaires à un organisme. Lorsque la S6 kinase est présente, les ribosomes et les protéines sont synthétisés en quantité suffisante, et les cellules croissent normalement jusqu'à avoir la taille nécessaire pour se diviser. Que se passe-t-il lorsque la S6 kinase est absente ?

J. Montagne a créé des mouches où le gène codant la S6 kinase est inactivé par une mutation : la plupart des insectes meurent pendant le stade

larvaire. Cependant, quelques-uns survivent jusqu'à l'âge adulte. Tandis qu'une drosophile normale se développe en neuf jours, ces drosophiles ont une croissance qui dure cinq jours de plus, et elles ont une taille réduite d'environ 40 pour cent par rapport à une mouche normale.

Un examen au microscope des cellules des ailes et des yeux a révélé que l'organisme est plus petit, car toutes les cellules de l'organisme sont réduites. Les insectes porteurs de la mutation sont des copies réduites des mouches normales ; cependant, ils ont autant de cellules que les insectes normaux (voir la figure). Malgré l'absence de S6 kinase, les drosophiles parviennent à se développer grâce aux ribosomes synthétisés en infime proportion et, surtout, à ceux hérités de l'ovocyte maternel, qui se répartissent à mesure du développement dans toutes les cellules de l'organisme.

Après l'observation des cellules d'une mouche adulte, J. Montagne a vérifié que la mutation a déjà des conséquences au cours du développement : il a observé des groupes de cellules, nommés disques imaginaires, situés à l'intérieur de la larve, qui formeront les ailes de l'insecte après la métamorphose. Les disques imaginaires présentent le même aspect en cercles concentriques (voir la figure ci-dessus) ; cependant, ceux des drosophiles porteuses de la mutation sont plus petits que ceux des drosophiles normales. De plus, les cellules des premiers sont également plus petites que celles des seconds, dans les mêmes proportions que les cellules des mouches adultes. C'est bien la preuve que la S6 kinase commande la taille des cellules.

La mise en évidence de l'action d'une enzyme sur la taille des cellules constitue un pas vers l'élucidation des mécanismes toujours inconnus par lesquels un organisme ou un organe «sait» qu'il a atteint sa taille normale.

BRÈVES

Métrique ou pas métrique

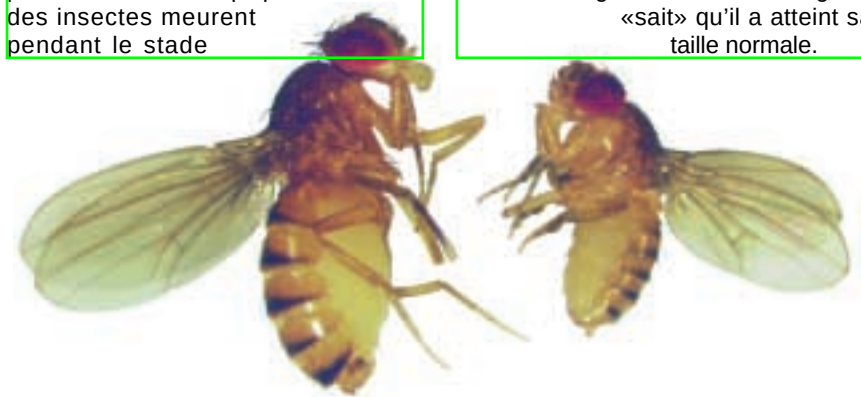
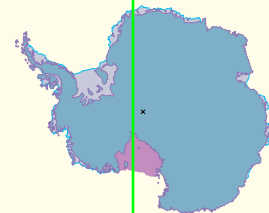
Dans son film *Brazil*, le cinéaste Terry Gilliam décrit des techniciens incapables de réparer une maison en raison d'un changement d'unités de mesure intervenu quelque temps plus tôt. La réalité dépasse parfois la fiction : c'est pour une erreur d'unités que le satellite de la NASA *Mars Climate Orbiter* a percuté la surface martienne le 23 septembre dernier. Une équipe de la Société *Lockheed Martin*, principal artisan de la sonde, a transmis des données exprimées en unités anglo-saxonnes (pieds, pouces, etc.) aux ingénieurs chargés de la navigation de la sonde, qui, eux, ont utilisé les unités du système international. Avant de penser à la mondialisation du commerce, pensons à la mondialisation des unités, entre les pays, et aussi entre les sociétés.

Ebola, es-tu là ?

Depuis 1976, les épidémies de fièvres hémorragiques dues au virus *Ebola* se manifestent de façon épisodique en Afrique centrale. Un tel comportement nécessite l'existence d'un «réservoir» où le virus se terre ; l'agent pathogène contamine l'homme au cours de contacts – directs ou indirects – occasionnels. Jusqu'à présent, les épidémiologistes situaient ce réservoir au cœur de la forêt équatoriale. Or, une équipe de l'Institut Pasteur a découvert des traces de ce virus chez des rongeurs et des musaraignes vivant à la périphérie des forêts, en bordure de la savane. Ce ne sont pas encore les réservoirs, mais ils pourraient nous y conduire.

Ainsi fond, fond,...

Le niveau de la mer remontera de six mètres... dans 7 000 ans lorsqu'en Antarctique, la banquise de Ross, qui s'étend sur la mer sur 1 000 kilomètres de longueur et 800 kilomètres de largeur (en rose sur la carte de l'Antarctique), se sera décrochée. L'équipe de Howard Conway, de l'Université de Washington, a établi cette prévision après avoir modélisé les courants internes de la calotte glaciaire d'après des données enregistrées par un satellite, et après avoir étudié le passé géologique des glaces et des terres qui bordent la calotte. Ils ont ainsi retracé le recul de la calotte et estimé, par extrapolation, la date de sa disparition.



L'absence de l'enzyme S6 kinase réduit la taille d'une drosophile adulte (à droite) d'environ 40 pour cent par rapport à une mouche normale (à gauche). Elle entraîne également la réduction des organes en cours de développement, tels les disques imaginaires, qui forment les ailes après la métamorphose (voir en haut). Sans influencer sur la prolifération, la mutation réduit la taille des cellules qui se divisent avant d'atteindre leur taille normale.

Un pauvre peuplier

La fabrication du papier à partir du bois est polluante, car elle nécessite l'élimination d'une substance indésirable, la lignine, qui confère au bois sa rigidité. En inhibant la synthèse d'une enzyme indispensable à la formation de lignine, une équipe du Centre de recherche sur les biotechnologies végétales, à Houghton, a créé des peupliers transgéniques dont la quantité de lignine est réduite de 40 pour cent par rapport aux arbres non modifiés. Une telle modification génétique d'espèces à



fort potentiel économique, tels l'eucalyptus et le pin, satisfera l'industrie papetière et les écologistes.

Hypernovæ

Le débat sur l'origine des sursauts gamma cosmiques est-il sur le point de s'achever? Après 20 ans d'observations et de travaux, les astronomes savent que ces éclairs de rayonnement gamma qui déchirent le ciel proviennent de galaxies qui entourent la nôtre, mais les avis restaient partagés sur l'événement initiateur : s'agissait-il de la coalescence de deux étoiles à neutrons ou de supernovæ particulièrement puissantes, des hypernovæ. Pour le sursaut du 26 mars 1998, la balance pencherait en faveur de la seconde hypothèse. Des astronomes ont observé que l'émission résiduelle dans le visible, qui a suivi le sursaut gamma, correspond à la courbe de lumière d'une supernova.

Détecteurs supersensibles

Comment suivre la piste d'un terroriste? En détectant des résidus d'explosifs ou d'agents biologiques. Grâce à une méthode de détection des molécules 100 fois plus sensible que les précédentes, les chimistes identifient des quantités infimes de molécules. L'identification est fondée sur la spectroscopie : les molécules absorbent la lumière d'une façon qui révèle leur nature. Malheureusement, lorsque les molécules sont rares, les interactions avec la lumière le sont aussi. Andrew Pipino, de l'Institut américain des standards et de la technologie, utilise un minuscule cube creux de silice. Un rayon laser y pénètre et y reste piégé, car il rebondit sur les faces internes du cube : il traverse ainsi 100 000 fois le cube, où sont placées les molécules à identifier. Grâce à cette méthode, la détection d'une molécule unique devient envisageable.

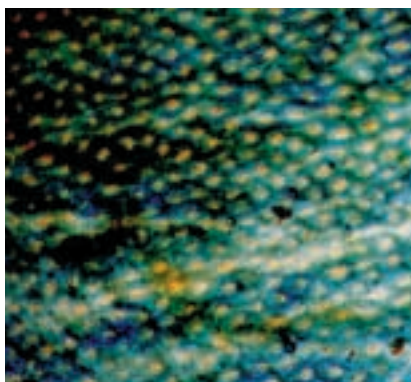
Prévention miracle?

Chez le rat, un laxatif usuel est un puissant agent contre le cancer du côlon.

Certains aliments favoriseraient l'apparition de cancers, d'autres les préviendraient. Ce qui fut longtemps une «croyance» semble de plus en plus solidement étayé. Nous avons étudié l'effet de la nourriture sur la survenue de cancers chez le rat, et cette étude nous a conduit à une découverte inattendue : le polyéthylène glycol utilisé, notamment, comme laxatif serait un traitement préventif du cancer du côlon.

Les molécules de polyéthylène glycol sont constituées d'un enchaînement de monomères d'oxyde d'éthylène, et ont pour formule $H-(O-CH_2-CH_2)_n-OH$, où n est compris entre 2 et 500 : ce sont des polymères hydrophiles. Le polyéthylène glycol n'est pas du tout toxique, et il est utilisé comme additif alimentaire : on en ajoute un peu aux glaces pour en améliorer la consistance. Il n'est pas absorbé par l'intestin, ni fermenté par la flore du côlon. Le polyéthylène glycol ayant un poids moléculaire égal à 4 000 sert de laxatif doux. On l'utilise aussi à forte dose pour préparer l'intestin avant une coloscopie.

Si le cancer du poumon est le plus meurtrier chez les fumeurs, le cancer du côlon est le plus fréquent chez les non fumeurs. Aujourd'hui, plusieurs équipes recherchent s'il existe un aliment qui jouerait, dans le cancer du côlon, le rôle de la cigarette dans le cancer du poumon. Nous avons nourri des rats avec des régimes très riches en viandes, notamment en bacon grillé. Nous pensions, *a priori*, que le bacon, gras et contenant des nitrosamines cancérigènes, favoriserait



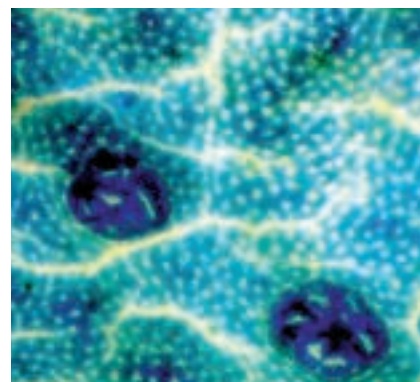
Sur la face interne d'un côlon normal, on observe au microscope ($\times 40$) les ouvertures de «cryptes», très régulières (à gauche, en jaune), qui servent essentiellement au passage de l'eau à travers la paroi intestinale. Après l'injection d'un agent cancérigène à un rat, certaines cryptes se transforment et forment des masses sombres et protubérantes (à droite). Le polyéthylène glycol les fait disparaître.

la croissance des tumeurs du côlon chez le rat. Or, nous avons découvert qu'au contraire, plus les rats mangent de bacon, moins vite les tumeurs de leur côlon grossissent. Nous avons alors émis l'hypothèse – la seule qui nous parut sensée – que le bacon, très salé, oblige les rats à boire beaucoup. Une forte consommation d'eau protégerait-elle contre le cancer du côlon? Des enquêtes récentes semblent confirmer, chez l'homme, cette première découverte.

Nous avons cherché si l'eau protégeait en favorisant l'excrétion fécale. Nous avons injecté à des rats un puissant agent cancérigène spécifique du côlon, l'azoxyméthane. On constate, un mois après l'injection, l'apparition de minuscules lésions, des microadénomes, sur la muqueuse du côlon. Plusieurs mois plus tard, les microadénomes ont grossi, et certains peuvent donner une tumeur nommée polype, ou un cancer.

Nous avons alors traité une partie des rats par un laxatif, le polyéthylène glycol : nous avons ajouté du polyéthylène glycol à la nourriture des rats pendant trois mois, en commençant une semaine après l'administration de l'agent cancérigène. Au bout de ces trois mois, les rats traités au polyéthylène glycol avaient 100 fois moins de gros microadénomes, et 20 fois moins de petits microadénomes, que les rats témoins qui n'avaient pas reçu de polyéthylène glycol.

Dans ce modèle, le polyéthylène glycol est dix fois plus efficace que tous les agents déjà testés. Il agit très vite, puisque trois jours de traitement suffisent à diminuer de moitié le nombre de microadénomes. Inversement, quand on arrête l'administration de polyéthylène glycol, le nombre de microadénomes augmente à nouveau. Le polyéthylène glycol agit sur des microadénomes récents, mais nous ignorons encore s'il peut détruire des cancers anciens. Chez le rat, il inhibe la formation des cancers du côlon.



Comment le polyéthylène glycol bloque-t-il la cancérogenèse intestinale ? Il ne modifie certainement pas le métabolisme de l'agent cancérogène, puisqu'il agit bien après son administration. Le polyéthylène glycol agit peut-être en protégeant mécaniquement la muqueuse : il s'interpose entre la muqueuse et le flux fécal et a un effet lubrifiant. Peut-être, le polyéthylène glycol agit-il, comme les fibres alimentaires, en diluant le contenu du côlon.

En effet, le polyéthylène glycol, qui est hydrophile et qui ne peut traverser la paroi intestinale, attire l'eau vers l'intérieur de l'intestin, par augmentation de la pression osmotique : deux milieux sépa-

rés par une paroi semi-perméable tendent à équilibrer les concentrations des éléments qu'ils contiennent en laissant passer de l'eau vers le milieu le plus concentré ; le contenu de l'intestin est ainsi dilué.

A cette dilution, s'ajouterait un effet délétère pour les cellules tumorales. Nous pensons que la pression osmotique due au polyéthylène glycol présent dans l'intestin déclenche un stress dans les cellules qui, pour maintenir leur volume, «luttent» contre cette aspiration d'eau. Les cellules tumorales seraient peut-être moins efficaces que les cellules normales pour lutter contre la pression osmotique ; elles

se déshydrateraient rapidement, se détacheraient de leurs voisins et seraient balayées par le flux fécal.

Les chercheurs s'interrogent : serait-ce le traitement préventif miracle que les cancérologues recherchent activement partout dans le monde ? Pour savoir si le polyéthylène glycol permettra d'éviter les 100 nouveaux cas de cancers colorectaux détectés chaque jour en France, il faudra d'abord confirmer son effet chez l'homme dans les conditions rigoureuses d'un essai clinique en double aveugle.

Denis CORPET et Géraldine PARNAUD
ENVY et INRA, Toulouse

Glaciers tropicaux

La fonte des glaciers tropicaux dépend plus de l'humidité que de la température.

Cela pourrait être une devinette : quelle est la différence entre un glacier tropical et un glacier des régions tempérées, par exemple un glacier alpin ? Face aux variations saisonnières, leur comportement est exactement inverse : alors que le glacier alpin fond pendant l'été, les glaciers tropicaux fondent pendant la saison humide (de novembre à mars) en même temps qu'ils accumulent de la neige.

Bien que les glaciers tropicaux représentent moins de cinq pour cent des glaciers de montagne du Globe, leur influence socio-économique est importante : les eaux de la fonte de ces glaciers alimentent en eau potable plusieurs grandes villes telles, en Amérique du Sud, La Paz, Lima ou Quito ; elles actionnent également des usines hydroélectriques. Les autorités boliviennes inquiètes du recul de ces glaciers observé depuis plusieurs années, et dans un souci de gestion des ressources, ont demandé à l'Institut de recherche pour le développement, l'IRD, d'étudier ce phénomène. Après avoir observé un glacier bolivien pendant plusieurs années, l'équipe de Pierre Ribstein a montré que c'est l'humidité, et non la température, qui commande la fonte de ces glaciers.

Sur un glacier – tropical ou non –, la glace se dépose en amont dans une zone d'accumulation, puis elle descend lentement et rejoint une zone d'ablation où elle fond en un torrent. Les deux zones sont séparées par une ligne d'équilibre où l'apport de glace est égal à la perte. Depuis 1980, le recul de cette ligne, située de plus en plus haut, traduit un réchauffement global du climat.

Sous les tropiques, la température varie peu d'une saison à l'autre, même si, au cours d'une journée, l'amplitude des températures peut atteindre 20 degrés. En revanche, les variations de précipitations sont importantes : environ 83 pour cent des précipitations tombent pendant la saison humide.

Pour comprendre le comportement inverse des glaciers tropicaux, les glaciologues ont installé deux stations météorologiques automatiques sur les pentes du glacier bolivien du Zongo, qui s'étend de 4 900 à plus de 6 000 mètres d'altitude, au Nord de la Paz. Ils ont mesuré les précipitations, la température, la vitesse et la direction du vent, ainsi que la quantité d'énergie absorbée par le glacier. Ils ont également mesuré le débit du torrent issu du glacier : il est trois fois plus grand pendant la saison humide que pendant la saison sèche. Or, la fonte des glaciers des autres régions du Globe suit un rythme inverse : les glaciers alpins fondent en été lorsque l'ensoleillement est maximal.

Les données recueillies montrent que, pendant la saison sèche, l'énergie solaire absorbée par le glacier sert surtout à la sublimation de la glace, qui passe directement de l'état solide à l'état vapeur. Ce changement d'état, qui requiert huit fois plus d'énergie que la fusion, restreint la quantité d'énergie disponible pour la fonte et l'alimentation du torrent. En revanche, pendant la saison humide, l'atmosphère est saturée en eau : la sublimation est freinée et l'énergie solaire est utilisée pour la fusion.

En marge du comportement saisonnier normal d'un glacier tropical, les oscillations australes du phénomène El Niño expliquent aussi partiellement le recul des glaciers. En Amérique du Sud, ces oscillations provoquent souvent une baisse des précipitations (d'environ 25 pour cent) et par une faible hausse des températures. Selon les glaciologues, ces fluctuations climatiques provoquent la disparition rapide

du manteau neigeux à la surface du glacier. La quantité de rayonnement réfléchi, représenté par l'albédo, diminue, de sorte que l'énergie absorbée augmente : la fusion est alors favorisée.

Les climatologues s'intéressent aux glaciers tropicaux, parce qu'ils espèrent, grâce à des carottages, comparer la mémoire des glaces tropicales à celle des glaces prélevées au Groenland qui ont déjà fourni des informations sur l'histoire du climat de la Terre.



En Bolivie, le glacier du Zongo (cercle de rouge) s'étend de 4 900 à 6 000 mètres d'altitude entre des moraines (zones dégagées). Les glaciologues ont installé deux stations météorologiques automatiques sur le versant du glacier (rectangles verts) et mesuré le débit du torrent (carré rouge) issu des eaux de la fonte du glacier. La ligne violette sépare la zone d'accumulation où la glace s'amoncelle de la zone d'ablation où elle fond.

Souris alcooliques

L'alcool ou certains calmants favorisent l'activation des récepteurs du GABA qui s'ouvrent et laissent passer des ions chlorure à travers la membrane des neurones qui les portent. Ce flux d'ions entraîne une sensation de satisfaction, ainsi qu'une inhibition de l'envie de consommation. Une équipe de l'Université de San Francisco a montré qu'en l'absence d'une enzyme de la famille des kinases, les récepteurs du GABA d'une souris restent plus longtemps ouverts : les messages de plaisir et d'inhibition sont plus durables. Il faut donc moins d'alcool ou de calmants pour atteindre le même état, et la «soif» de l'individu est réduite. Des traitements qui inhiberaient cette enzyme pourraient lutter contre l'alcoolisme et l'anxiété.

La fin de l'acide

Depuis le début de la Révolution industrielle, les émissions de composés acides augmentaient : sulfures et composés azotés (essentiellement des oxydes), principalement émis par les combustibles fossiles, étaient rejetés dans l'atmosphère ; redéposés par les précipitations, ils acidifiaient les sols et les eaux. Pourquoi parler au passé de ces «pluies acides»? Parce que les efforts de réduction des émissions de sulfures et d'oxydes d'azote, menés depuis 1985, semblent efficaces : une équipe internationale qui surveille des lacs d'Europe et d'Amérique du Nord a montré que l'acidification des sols et des lacs s'affaiblit lentement.



Simple ou double?

La plupart des mammifères sont diploïdes : leurs chromosomes s'organisent par paires, et presque tous les gènes sont présents en deux exemplaires. La polyploïdie, c'est-à-dire que les chromosomes ne sont pas présents par paire, mais en nombre supérieur, est normalement fatale. Or, en Argentine, des zoologistes ont découvert une espèce de rat tétraploïde, où la majorité des chromosomes sont présents en quatre exemplaires ; quelques-uns, notamment les chromosomes sexuels, ne sont qu'en double comme chez les organismes diploïdes. Selon les zoologistes, seule cette élimination génétique a permis à l'animal d'exister et de se reproduire.

Chandelles standards

Les supernovae lointaines sont-elles semblables aux supernovae proches?

Bien qu'elles soient à l'autre bout de l'Univers, les supernovae causent bien du souci ici bas. Fin 1998, les astronomes découvrent que ces explosions stellaires sont moins lumineuses que prévu, vraisemblablement en raison de la structure même de l'espace : contrairement à ce que pensaient jusqu'ici les cosmologistes, plutôt que de ralentir, l'expansion de l'Univers s'accélérerait. Selon Adam Riess et ses collègues de l'Université de Berkeley, l'annonce de cette surprenante découverte a été un peu précipitée, «un peu comme l'annonce de la découverte de la vie sur la météorite martienne», s'amuse-t-il à dire.

Le débat sur l'accélération cosmique est fondé sur la mesure de deux quantités clés pour chacune des supernovae lointaines repérées : la luminosité maximale de l'explosion et son décalage vers le rouge. La luminosité maximale de l'explosion semblait dépendre uniquement des caractéristiques intrinsèques de la supernovae : elle donnerait accès à la distance de l'explosion, mais comment estime-t-on cette distance? Imaginons une bougie dont on connaîtrait les caractéristiques, donc la luminosité absolue, placée à une distance inconnue. À partir de sa luminosité observée et de sa luminosité absolue, on déduit la distance. L'autre mesure, le décalage vers le rouge, indique quelle a été l'expansion de l'Univers depuis l'explosion de la supernova.

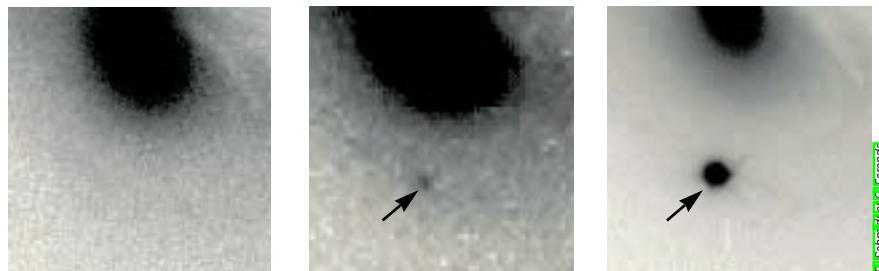
La supernova la plus ancienne connue a explosé voici 8,4 milliards d'années et, depuis, l'Univers a doublé de taille. Cependant, d'après le taux d'expansion actuel (dédié de l'observation de supernovae récentes), l'Univers devrait avoir triplé sa taille en 8,4 milliards d'années. Les astronomes en déduisent que l'expansion s'est accélérée.

Le déficit de luminosité sur lequel sont fondées ces conclusions est de l'ordre de 25 pour cent. Or, la variation naturelle de la luminosité maximale des supernovae, le paramètre utilisé par les cosmologistes, est du même ordre de grandeur, probablement en raison de différences dans la masse et dans la composition des étoiles progénitrices de l'explosion. Avec une telle disparité, les supernovae sont de mauvaises chandelles standards et, donc, de mauvais étalons de distances. Cependant, en étudiant des supernovae proches, les observateurs remarquèrent que plus la luminosité maximale est élevée, plus elle décroît lentement. En mesurant la décroissance de la luminosité des supernovae, les astronomes réussissent à compenser les variations dues aux disparités de composition. Les supernovae sont enfin des chandelles standards, des objets dont la courbe de luminosité indique leur luminosité intrinsèque.

La validité de ce concept de chandelle standard ne tient que si l'on suppose que ce qui est valide pour les supernovae proches l'est aussi pour les supernovae lointaines. Est-ce vraiment le cas? Le groupe d'A. Riess a remis cette hypothèse en cause en s'intéressant à une donnée habituellement négligée : le temps mis par une supernova pour atteindre son maximum de luminosité, le temps de montée de la courbe de lumière. En mesurant l'évolution de la luminosité de dix supernovae proches, les astronomes ont déterminé que le temps de montée moyen est de 20 jours, contre 17,5 jours pour les supernovae lointaines. Le scénario des explosions stellaires différerait selon l'époque de l'explosion.

Autre signal d'alarme : les différentes formules utilisées pour compenser les variations naturelles de la luminosité des supernovae engendrent des valeurs de la luminosité légèrement différentes.

De nombreux théoriciens pensent que ces désaccords ne sont pas fondamentaux. Le temps de montée de la luminosité dépend des premiers stades de l'explosion et il est très sensible aux caractéristiques de l'étoile progénitrice. À l'inverse, le maximum de luminosité et le temps de décroissance résultent de



Photographies d'une supernova dans une galaxie proche, avant l'explosion (à gauche), un jour après (au centre) et lors du maximum de luminosité (à droite).

l'émission des restes de la supernova, longtemps après l'explosion ; cette émission est *a priori* indépendante des caractéristiques de l'étoile progénitrice.

Ces divergences pourraient indiquer que l'accélération de l'expansion de l'Univers n'est qu'un artefact ou qu'elle résulte d'un biais observationnel. Les supernovae distantes ont été découvertes à l'aide de détecteurs électroniques, alors que les supernovae proches l'ont été sur des photographies. Or, les films photographiques surexposent le centre des galaxies et masquent ainsi les supernovae qui pourraient s'y trouver. Les échantillons de supernovae ne sont donc peut-être pas représentatifs.

Seules de nouvelles études, conçues spécifiquement pour éviter de tels biais vérifieront si, oui ou non, les supernovae proches et distantes sont comparables, et si l'expansion de l'Univers s'accélère ou non.

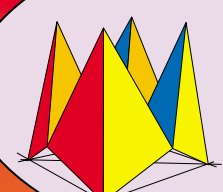
Claustrophobie quantique

Des physiciens créent de la matière dans un état dégénéré, analogue à celle des étoiles à neutrons, dans un gaz ultrafroid.

Au plus profond de la matière, les fermions : le proton et le neutron, constituants du noyau, sont des fermions, tout comme les électrons, et la structure du tableau périodique (et donc toute la chimie) repose sur ce fait. Si, récemment, l'attention s'est surtout portée sur leurs cousins, les bosons, c'est en raison d'une réalisation expérimentale marquante : la condensation de Bose-Einstein. Aujourd'hui, ce sont les fermions qui sont sous les feux de la rampe après que deux physiciens américains ont obtenu un «gaz de Fermi dégénéré», à la température de 0,3 microkelvin (0,3 milliardième de degré au-dessus du zéro absolu).

Les bosons sont des particules élémentaires grégaires. Si grégaires que, dans un condensat de Bose-Einstein, un million de bosons s'assemblent dans le même état quantique, une sorte de super-particule. À l'inverse, les fermions sont individualistes : il est impossible d'en mettre deux dans le même état quantique au même endroit. Les fermions obéissent ainsi au principe d'exclusion de Pauli : la présence d'un fermion en un endroit exclut celle d'un autre fermion.

Les bosons ont des spins – le moment cinétique intrinsèque des particules – qui

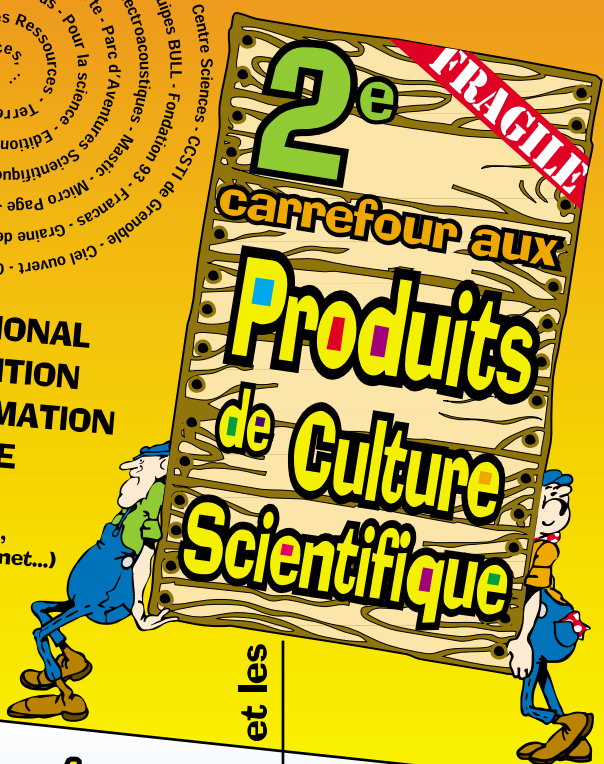


Le Festival des Passions Technologiques

Bourges
18 - 19 - 20
novembre 1999

PROPOSE

LE



et les

20 années d'animation scientifique en France.

5èmes
RENCONTRES DE L'ANIMATION SCIENTIFIQUE de Bourges

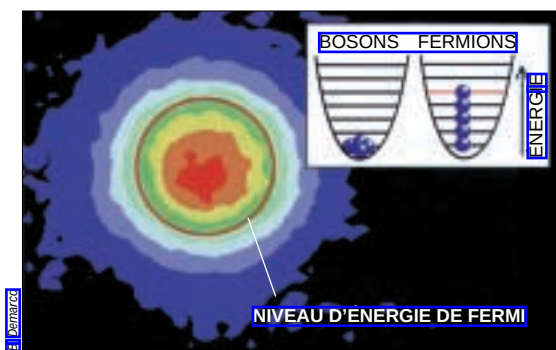
Le SALON NATIONAL DE L'EXPOSITION ET DE L'ANIMATION SCIENTIFIQUE
(expos itinérantes, malles pédagogiques, cédéroms, sites internet...)

• Bilans et perspectives.
• Les nouvelles formes d'animation.

02 48 57 80 13



BOURGES



A basse température, les atomes de potassium au comportement de fermions se rassemblent. Au zéro absolu, tous devraient se trouver à l'intérieur du cercle rouge et remplir les niveaux d'énergie les plus bas du piège magnétique (à droite dans l'encart). Au contraire, les bosons se regroupent tous dans le niveau le plus bas (à gauche dans l'encart).

prennent des valeurs entières, alors que les fermions ont des valeurs de spins demi-entières (1/2, 3/2, etc.). De cette différence résulte leur différence de comportement de groupe, patente à basse température, lorsque les particules se mettent dans le plus bas niveau d'énergie disponible. À mesure que la température diminue, les bosons « tombent » brusquement tous ensemble dans l'état d'énergie minimale. Les fermions eux, se comportent plutôt comme des personnes qui descendent un escalier les unes derrière les autres : à mesure que l'on approche du zéro absolu, ils remplissent toutes les marches en commençant par la plus basse. Connu sous le nom de dégénérescence de Fermi, cet état joue un rôle essentiel dans les propriétés électriques des métaux et des semi-conducteurs, ainsi que dans la stabilisation des naines blanches et des étoiles à neutrons qui doivent résister à l'effondrement gravitationnel.

Pour créer un système de Fermi dégénéré, Deborah Jin et Brian de Marco, de l'Université de Boulder, ont utilisé le refroidissement par évaporation d'un gaz

d'atomes placés dans un piège magnétique, technique déjà utilisée pour créer un condensat de Bose-Einstein. Les physiciens ont choisi le potassium 40, composé de 40 protons et neutrons et de 19 électrons. Cet élément a un comportement de fermion, car il contient un nombre impair de fermions.

La création d'un état de Fermi dégénéré est délicate : il ne suffit pas de jeter quelques fermions dans un système qui produit des condensats de Bose-Einstein. En raison de leur comportement, les fermions sont bien plus difficiles à refroidir que les bosons. Le refroidissement par évaporation est efficace à condition que l'on évacue les particules les plus chaudes et que les collisions entre particules dissipent en permanence l'énergie des chocs. Avec des fermions identiques, les collisions deviennent rares dans le régime quantique dégénéré. À chaque particule est associée une onde, dont la longueur caractéristique augmente à faible énergie. Le principe d'exclusion empêche une paire de fermions identiques de se rapprocher à une distance inférieure à cette longueur d'onde. Plus la longueur d'onde associée aux atomes augmente, plus la probabilité qu'ils entrent en collision diminue.

Pour pallier ce déficit de collisions, les physiciens ont utilisé un mélange à parts égales d'atomes dans deux états magnétiques proches, mais différents, des états Zeeman. Or, le potassium 40 possède deux états magnétiques qui peuvent être simultanément pris dans un piège magnétique. Deux atomes dans des états Zeeman différents peuvent

entrer en collision, même dans le régime dégénéré, car ils ne sont pas parfaitement identiques. Cette collision mixte autorise un refroidissement par évaporation efficace des deux variétés d'atomes.

Comment prouver que ces atomes sont bien dans un état dégénéré ? L'équipe américaine a montré qu'à une température inférieure à 0,3 microkelvin, les atomes ont plus d'énergie et une répartition des vitesses différente de ce que prévoit la physique classique. Cette particularité résulte du principe d'exclusion : lorsque les états atomiques les plus bas sont remplis, les atomes restant doivent se mettre dans des états d'énergie supérieure.

D'autres physiciens sont aussi en quête de cet état dégénéré. L'équipe de John Thomas, à l'Université Duke, a étudié le premier piège à fermions fondé sur des lasers. Ils espèrent refroidir un mélange de deux états du lithium 6 (au comportement de fermions) qui ne peuvent pas être retenus par un piège magnétique. Christophe Salomon et son équipe de l'École normale supérieure refroidiront un mélange de lithium 6 (fermion) et de lithium 7 (boson) à l'aide d'un piège magnétique. Le refroidissement d'un tel mélange permettrait d'obtenir un régime encore plus dégénéré, c'est-à-dire que toutes les marches les plus basses de l'« escalier » seraient occupées.

Le lithium 6 est particulièrement intéressant parce que ses atomes s'attirent à très basse température, et forment un autre état dégénéré : l'état de paires de Cooper, qui, lorsqu'il se produit avec des électrons, engendre la supraconduction (le transport d'électricité sans échauffement). Les atomes de lithium 6 s'apparieraient, devenant des bosons composites qui perdraient ainsi leur caractère de fermion et pourraient se retrouver dans un état condensé de Bose-Einstein.

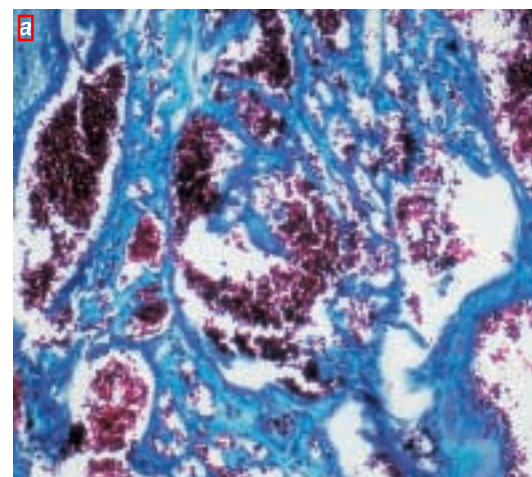
Des hémorragies cérébrales héréditaires

On a identifié une protéine responsable d'accumulations de sang dans le cerveau.

Certaines hémorragies cérébrales, parfois responsables de crises d'épilepsie, résultent d'une anomalie des petits vaisseaux qui sillonnent le cerveau : du sang s'accumule dans des sortes de cavernes, formant ce que l'on nomme des angiomes caverneux. En étudiant des familles où ces malformations vasculaires cérébrales sont fréquentes,

l'équipe d'Élisabeth Tournier-Lasserre (INSERM U25 et Hôpital Lariboisière) a trouvé un gène, localisé sur le chromosome 7, qui, lorsqu'il est muté, engendre cette maladie. En France, environ 30 000 personnes seraient atteintes, parfois sans le savoir.

Ces lésions cérébrales ne se manifestent parfois qu'après l'âge de 50 ans, voire plus tard. La découverte de la maladie se fait souvent par hasard au cours d'un examen par imagerie médicale (IRM) fait pour une raison quelconque. Quelque 20 pour cent des personnes atteintes ont une forme familiale de la maladie. L'autre forme, dite sporadique, touche des personnes en dehors de toute prédisposition familiale. Les personnes ayant une forme familiale ont parfois, en plus des angiomes



Lors de certaines hémorragies cérébrales, dues à une anomalie des capillaires, les globules rouges s'accumulent dans des cavi-

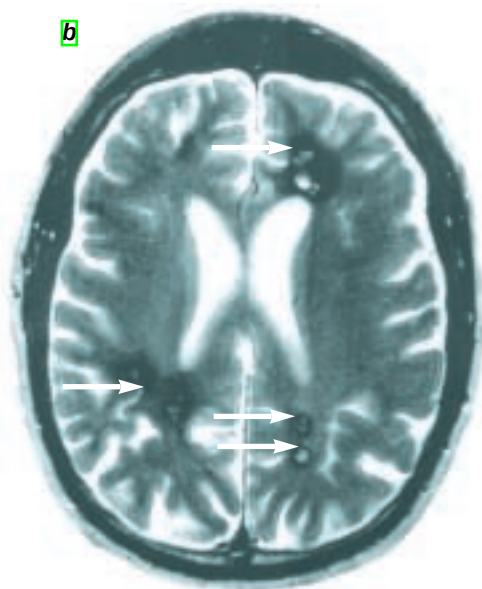
cérébraux, des angiomes de la rétine et de la peau. Les angiomes cutanés sont parfois déjà présents à la naissance. Dans les formes familiales, les personnes atteintes ont presque toujours (dans 85 pour cent des cas) plusieurs angiomes caverneux, une dizaine, voire davantage ; le nombre et la taille des angiomes caverneux augmentent à mesure que les personnes vieillissent. Les personnes ayant une forme sporadique ont une seule lésion cérébrale et n'ont jamais d'angiome cutané.

Les angiomes caverneux se traitent chirurgicalement. Si le traitement est généralement bien supporté et efficace, les neurochirurgiens sont parfois démunis, lorsque les lésions sont difficilement accessibles, notamment quand elles sont localisées dans le tronc cérébral.

En étudiant les formes familiales, des équipes américaines avaient déjà localisé trois gènes, sur les chromosomes 3 et 7, mais ils ne les avaient pas identifiés. En 1996, l'équipe d'É. Tournier-Lasserre a commencé, en collaboration avec les neurochirurgiens français et la Société française de neurochirurgie, une enquête nationale pour rassembler des familles atteintes de cette maladie. L'analyse clinique d'une cinquantaine de familles, menée par Pierre Labauge, a été suivie de l'identification d'un des gènes incriminés, nommé *KRIT1* ; puis, Sophie Laberge a mis en évidence, sur ce gène, des mutations qui aboutissent toutes à la synthèse d'une protéine *KRIT1* tronquée.

Cette protéine était connue, mais n'a quasiment pas été étudiée, de sorte qu'on ignore encore quel est son mode d'action. Toutefois, on sait qu'elle interagit

b



tés (a, en rouge) ; les anomalies sont révélées par imagerie par résonance magnétique (les zones noires, b).

avec la protéine Rap1A et que la région qui manque lorsque le gène *KRIT1* est muté est précisément la région d'interaction avec la protéine Rap1A. Lorsque ces deux protéines n'interagissent pas, les vaisseaux sanguins du cerveau sont anormaux. Cette protéine serait un élément important de l'angiogenèse.

Selon É. Tournier-Lasserre, les malades atteints de la forme familiale auraient hérité de leur père ou de leur mère une copie, ou allèle, du gène *KRIT1*

mutée (l'autre allèle étant normal) ; des lésions apparaîtraient lorsqu'à un moment donné de leur vie, quelques unes de leurs cellules vasculaires acquerraient une mutation sur le deuxième allèle *KRIT1*. Au contraire, dans les formes sporadiques, quelques cellules vasculaires devraient acquérir deux mutations *de novo*, pour qu'un angiome caverneux se forme. Cela expliquerait qu'une personne née avec un allèle *KRIT1* muté ait plus de risques

d'avoir des angiomes caverneux multiples qu'une personne née avec les deux allèles *KRIT1* normaux.

Avec cette protéine, on dispose d'une nouvelle molécule contrôlant l'angiogenèse. Pour concevoir un éventuel traitement, il faudra découvrir comment elle agit dans un mécanisme à plusieurs partenaires. Toutefois, cette maladie étant due à l'inactivation d'un seul gène (*KRIT1*), on peut imaginer la traiter, un jour, par thérapie génique.

Manque de forêts

L'homme conjugue son influence à celle de la nature pour transformer les paysages. Pour évaluer ce rôle, l'Organisation non gouvernementale *Population action internationale* évalue les ressources forestières disponibles par personne dans 157 pays.

Aujourd'hui, 1,7 milliard d'êtres humains vivent dans l'un des 40 pays où la couverture forestière est très faible (moins de 0,1 hectare par habitant). Parmi les pays dont la diminution des forêts est spectaculaire, la Guinée, qui est passée de 117 hectares par habitant en 1980 à 54 en 1995, et, selon les prévisions, tomberait à 26 en 2025. Au Gabon, ces chiffres sont respectivement de 28, 16 et 8 hectares. Autre exemple, la Bolivie, dont les ressources forestières par personne ont également chuté : 10,38 hectares, 6,52 et 2,59. Si le déboisement se poursuit au rythme actuel, en 2025, 4,6 milliards d'habitants risquent de vivre dans des pays en pénurie de forêts. L'Asie et l'Afrique sont deux continents qui risquent de manquer de ressources forestières d'ici à 2025. Dans 20 pays, qui comptent au total 250 millions habitants, la situation est critique, avec une pénurie à la fois de forêts et d'eau. Cette convergence de circonstances menace les écosystèmes et compromet le développement des pays pauvres.

Là où la croissance démographique est la plus forte, les phénomènes de déforestation sont les plus importants. Si aujourd'hui, le nombre d'hectares de forêt par habitant est à peu près identique en Inde et en Belgique, on estime qu'en 2025, la couverture par personne de l'Inde aura baissé de 30 pour

cent du fait que sa population aura augmenté de 300 millions d'habitants ; en Belgique, cette proportion restera inchangée puisque sa population est stabilisée.

Même dans les pays où la superficie des forêts a augmenté, les ressources forestières par personne diminuent. En Chine, par exemple, la surface forestière a augmenté entre 1980 et 1995, tandis que, rapportée au nombre d'habitants, elle diminuait : les efforts de reforestation n'ont pas réussi à suivre la croissance démographique.

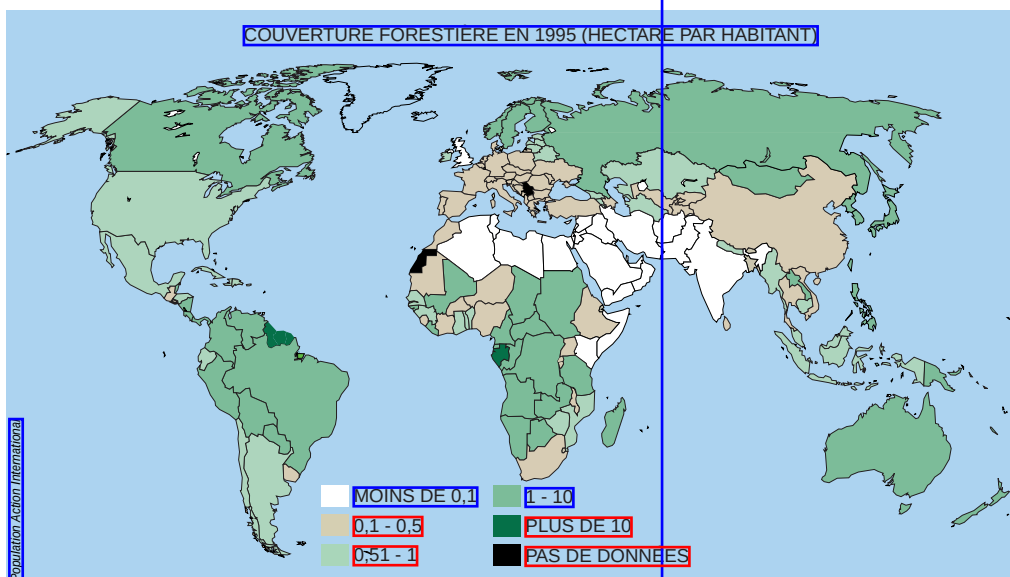
La surface des forêts augmente dans les pays industrialisés alors qu'elle diminue dans les pays en développement. Pourtant, en Europe, jusqu'à la fin du XIX^e siècle, les forêts qui couvraient la majorité du territoire ont été massivement détruites, en grande partie pour créer des surfaces arables. Ce n'est que récemment que les forêts européennes ont retrouvé une phase de croissance.

Dans les pays en développement, la déforestation répond parfois à une nécessité de survie, parfois au développement économique : près de trois milliards d'individus utilisent du bois comme source d'énergie principale. Quand les réserves forestières ne sont pas reconstituées à mesure de leur destruction, les populations vont couper du bois dans des zones toujours plus éloignées.

Dans ces pays, la disparition des forêts menace la biodiversité et réduit le bois utilisable pour produire du papier. On estime que huit personnes sur dix n'ont pas le papier nécessaire à leur alphabétisation, à leur éducation, ou celui qu'il

faudrait pour communiquer. De nouvelles diminutions des stocks de papier, dues à un manque de bois, anéantiraient les efforts que déploient les pays pauvres pour l'éducation de leur population. Or, leur développement économique en dépend.

Dans le monde, la natalité est passée de cinq enfants par femme, il y a 30 ans, à trois aujourd'hui. Cette diminution démographique est de bon augure et sans doute, un espoir pour la préservation de la forêt.



Les fortifications de Nancy

Les remparts qui entouraient la ville avaient été oubliés. Ils ressurgissent au gré des chantiers de construction.

En 1990, des travaux sont entrepris en vue de l'extension du musée des beaux-arts de Nancy ; on découvre alors les vestiges particulièrement bien conservés d'une enceinte urbaine, oubliée depuis longtemps. Si la ville n'avait pas suscité un grand intérêt de la part des archéologues, car elle est de création récente, ces fouilles ont révélé les restes exceptionnels d'un bastion et d'une ceinture de pierre, démantelés au XVIII^e siècle.

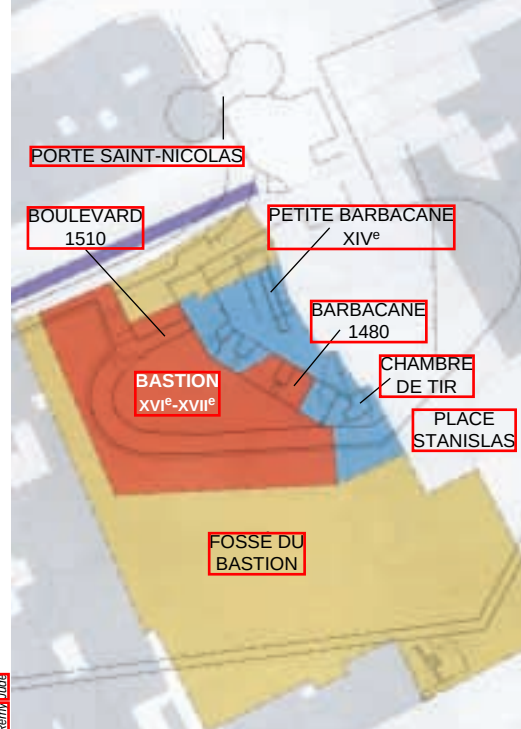
Les fouilles, commencées en 1990, ont été menées au cours de quatre campagnes. La mise au jour du bastion d'Haussonville, du nom du gouverneur de Nancy de 1560 à 1563, et le dégagement de son remparement ont révélé des ouvrages inconnus de l'historiographie nancéenne : une barbacane, c'est-à-dire un ouvrage de fortification avancé qui assure la défense d'une porte, datant des années 1480, et un boulevard d'artillerie, c'est-à-dire un ouvrage de fortification placé en avant d'une enceinte plus ancienne, construit en 1510. Les fouilles ont livré deux siècles d'architecture militaire, à quelques dizaines de mètres de la place Stanislas. L'étude de ces ouvrages et le dépouillement des archives ont renouvelé les connaissances sur la ville et sur ses fortifications. Les archéologues ont également découvert des objets qui, hormis quelques boulets de

pierre, ne sont pas liés à l'utilisation de la forteresse. Ce sont des objets de la vie quotidienne, jetés dans le fossé ou mêlés aux remblais : poterie culinaire, carreaux de poêles décorés, sifflets d'enfant, verrerie, objets métalliques tels épingles de vêtement, chaudron, cotte de maille, objets de cuir et morceaux de tissus. La plupart datent de la première moitié du XVI^e siècle.

Ces découvertes ont permis de retracer l'histoire de la ville. Au XII^e-XIII^e siècle, la porte Saint-Nicolas est élevée pour contrôler l'accès Sud de la cité. À la fin du XIV^e siècle, une barbacane est construite en avant de la porte et en renforce la défense. Vers 1480, le Duc de Lorraine René II (1473-1508) conforte le système défensif de la ville. La barbacane Saint-Nicolas est construite autour de celle du XIV^e siècle. Les fouilles ont révélé un ouvrage conservé sur 3,5 mètres de hauteur, qui atteignait sans doute 7 mètres à l'origine. Ses murs ont 6 mètres d'épaisseur et résistaient aux armes les plus puissantes de l'époque. Des chambres de guet et de tir y avaient été aménagées. Vers 1500-1510, la barbacane Saint-Nicolas est remaniée pour s'adapter aux progrès de l'artillerie.

Les boulevards d'artillerie qui doivent amortir l'impact des projectiles se caractérisent par un remplissage de terre ou par une maçonnerie épaisse. Ils ont été construits lorsque la poudre a commencé à être utilisée dans l'armement, au XIV^e siècle. Puis, les Nancéens ont adapté leur hauteur et leur forme à l'évolution de l'artillerie. Un fossé aménagé devant l'ouvrage complète le système défensif. Un enclos de bois y a été découvert : c'était peut-être une citerne ou un vivier qui, dès le milieu du XVI^e siècle, fut utilisé comme dépotoir.

Vers 1560, l'ensemble barbacane-boulevards a été englobé par la construction



Au cours des quatre campagnes de fouilles faites à Nancy depuis 1990 (la première en rouge, la deuxième en bleu, la troisième en violet et la quatrième en jaune), les vestiges du système défensif de la porte Saint-Nicolas ont été mis au jour.

du bastion d'Haussonville. Vers 1515, le bastion remplace la tour dans la défense des places fortes en Europe. Saillant sur l'enceinte, il a une base polygonale. Il est introduit dans le duché de Lorraine vers 1540 par les ingénieurs fortificateurs italiens. La ville s'étend au Sud-Est et on doit la défendre. Sur les conseils de l'Italien Antoine de Bergame, la duchesse de Lorraine Chrétienne de Danemark opte pour les bastions. L'ingénieur fait élever le bastion d'Haussonville et celui de Vaudémont. Seule la partie Ouest du bastion d'Haussonville a été mise au jour. Le soubassement est constitué de blocs de pierres surmontés de briques. Sur toute la hauteur du parement en briques, des chaînages verticaux renforcent l'ensemble.

En 1661, l'ensemble du front bastionné est démantelé sur ordre du roi de France, qui voyait dans cette construction prestigieuse une menace pour son pouvoir. Dix ans plus tard, lors des guerres de Hollande, le front est reconstruit, par Vauban, sur les parties du soubassement encore en place. Après reconstruction, le bastion d'Haussonville s'élève à 17 mètres de hauteur, alors qu'il n'en faisait que 14 avant sa démolition, en 1661 ; les vestiges mis au jour mesurent cinq mètres environ. L'ensemble sera ensuite progressivement démantelé lorsque la ville s'agrandira. Le front bastionné qui entourait Nancy est aujourd'hui au cœur de la cité qui, en le mettant au jour, a rouvert le livre de son histoire.

René ELTER — AFAN, Nancy



Vue du chantier archéologique du musée des Beaux-arts de Nancy, à proximité de la place Stanislas.

Sismique et tectonique

MAURICE MATTAUER

Grâce à la tomographie sismique, les géologues retracent l'enfoncement des plaques dans le manteau et réanalysent la formation des montagnes. La dynamique de l'écorce terrestre est expliquée par celle du manteau.

Née il y a 30 ans, la tectonique des plaques a restructuré notre connaissance de la dynamique du Globe. Selon cette vision, les plaques se déplacent les unes par rapport aux autres à des vitesses de quelques centimètres par an. De leur écartement naissent les océans, de leur collision, les montagnes.

Au voisinage des rides océaniques, zones de divergence des plaques, la vitesse d'écartement peut atteindre 15 centimètres par an, c'est-à-dire 1 500 kilomètres en seulement dix millions d'années. Lorsque les plaques se rapprochent et s'affrontent, l'une finit par passer sous l'autre. Le phénomène est appelé subduction, et la compression des plaques plisse la croûte terrestre pour former les chaînes de montagnes à proximité de la zone de subduction.

Les zones de subduction les plus nombreuses correspondent à l'enfon-

cement d'une plaque océanique sous une autre ; la vitesse de cet enfouissement atteint dix centimètres par an. Plus rarement, la zone de subduction est le siège de l'enfoncement d'une plaque continentale. La vitesse est alors inférieure à cinq centimètres par an.

La surface des océans augmente actuellement, le long des rides océaniques, d'environ trois kilomètres carrés par an. Comme la surface de la Terre est constante, cette augmentation est nécessairement compensée par l'enfoncement, dans les zones de subduction du manteau, d'une surface de plaques comparable. Une question se pose naturellement : jusqu'à quelle profondeur les plaques plongent-elles dans le manteau ? Nous verrons que les interprétations récentes des variations de vitesse des ondes sismiques ont bouleversé les hypothèses antérieures. Les géologues savent visualiser l'enfoncement des plaques qui plongent plus profondément qu'ils ne le croyaient.

Le lent ballet des plaques à la surface de la Terre est géométriquement simple : les déplacements horizontaux des plaques imposent les enfoncements de plaques froides dans

le manteau, ce qui est compensé par la montée de matériel chaud arrivant dans l'axe des rides océaniques. Pour expliquer ces déplacements, on invoqua, dès le début, des courants de convection. La chaleur issue de l'intérieur de la Terre remontait en surface comme dans un liquide, par des courants de convection en boucle. Des difficultés apparurent dès que l'on chercha à déterminer la taille des cellules de convection.

En cartographiant les emplacements des épicentres des tremblements de terre qui soulignent toutes les zones de subduction, les géologues pensèrent que les plaques s'enfonçaient dans les entrailles de la Terre de quelques centaines de kilomètres seulement, la valeur limite de 600 à 700 kilomètres n'étant atteinte qu'exceptionnellement. On interpréta ces valeurs assez faibles (par rapport aux déplacements horizontaux des plaques) en supposant que les plaques lithosphériques plongeantes perdaient peu à peu leur rigidité en raison de l'augmentation de la température et de la pression avec la profondeur : trop molles,

1. MASSIF DE L'HIMALAYA AU NORD DE L'INDE. Ces montagnes résultent de la collision de la péninsule indienne avec le continent asiatique. La subduction de la plaque indienne qui s'enfonce dans le manteau a été reconstituée par tomographie.

les plaques plongeantes ne s'enfonçaient plus profond.

On essaya alors d'imaginer ce qui se passait à plus grande profondeur, et ce jusqu'à la base du manteau, située à 2 900 kilomètres de profondeur. Pendant plus de 20 ans, les modèles fleurirent. Pour simplifier à l'extrême, les discussions ont longtemps oscillé entre deux modèles extrêmes. Au début de la tectonique des plaques, on privilégia un modèle à deux couches, caractérisé par une couche supérieure, n'ayant que 600 kilomètres d'épaisseur, et une couche inférieure très épaisse. On supposa que les plaques étaient entraînées par les courants de matière situés à la partie supérieure des petites cellules de convection du manteau supérieur. Dans cette configuration, le manteau inférieur était animé par des cellules de convection beaucoup plus grandes, les deux systèmes étant plus ou moins indépendants. Cette interprétation était compatible avec les changements de rhéologie du manteau qui se produisent théoriquement à 410 et à 660 kilomètres de profondeur. À cette profondeur, sous l'effet des augmentations de pression et de température, la structure cristalline des roches est modifiée : l'olivine se transforme en spinelle, puis en pérovskite.

Ce modèle à deux couches est aujourd'hui remplacé par un modèle à une couche, où les plaques descendent à grande profondeur, parfois à 2 900 kilomètres, jusqu'à la base du manteau. La figure 2 montre les conséquences de ce nouveau modèle sur la tectonique des plaques. La dynamique des plaques n'est plus confinée à un système superficiel limité au manteau supérieur ; elle est désormais partie intégrante de la dynamique du manteau terrestre tout entier. Les plaques en mouvement à la surface de la planète correspondent, en définitive, à la partie visible des grands mouvements de matière qui animent le manteau. C'est, pour la géologie, une révolution : comme l'avait pressenti le fabuliste Jean de La Fontaine, «C'est le fond qui manque le moins».

La tomographie sismique du manteau

Les affirmations précédentes sont étayées par la tomographie sismique. L'intérieur du globe est inatteignable par l'exploration directe, mais sa structure est reconstituée par les mesures

des vitesses de propagation des ondes sismiques, lesquelles dépendent de la nature, de la structure et de la température des roches qui s'y trouvent.

Le principe de la tomographie sismique est analogue à celui de la tomographie médicale. Au lieu de rayons X, les géologues utilisent, pour étudier la nature des constituants de la terre, les ondes sismiques élastiques, résultant de tremblements de terre importants. Ces ondes traversent la Terre et ralentissent ou accélèrent en profondeur. En mesurant les temps de propagation de l'onde entre l'épicentre du séisme et diverses stations sur le globe terrestre, on en déduit les variations de vitesses sismiques associées. Celles-ci sont dues à des différences de température du manteau ou à des changements de composition, que l'on sait identifier. Cette tomographie permet de reconstituer la structure des roches traversées par les ondes sismiques.

Les résultats sur la constitution du manteau ont été obtenus grâce au traitement d'un nombre extraordinaire de données. Harman Bigward et ses collègues se sont en effet servi des ondes émises par 82 000 séismes, bien localisés, qui se sont produits sur toute la surface du Globe entre 1964 et 1995, et qui ont été enregistrés dans tous les observatoires existants. Ces chercheurs ont traité plusieurs millions de données avec des ordinateurs extraordinairement puissants. Comme les ondes se propagent lentement dans les zones chaudes et plus rapidement dans les zones froides, on sait reconstruire un modèle tridimensionnel des variations de structure du manteau. Elles sont visualisées sur des coupes verticales ou sur des cartes établies à différentes profondeurs. Certaines de ces données sont accessibles sur Internet.

La figure 3, obtenue par Stephen Grand détaille comment on a réussi à trouver la trace des plaques dans le manteau. Les couleurs indiquent les variations de vitesse des ondes sismiques par rapport à une valeur moyenne.

La bande bleue qui descend obliquement jusqu'à 2 700 kilomètres de profondeur correspond à une zone froide. On pense qu'il s'agit de la trace laissée par une plaque froide qui s'est enfoncée dans une ancienne zone de subduction. Les matériaux de la plaque se sont beaucoup réchauffés depuis, mais ils se signalent encore, soit par une anomalie thermique, soit par une composition différente.

Cette interprétation fut d'abord mise en doute en raison des écarts de vitesse utilisés, qui étaient jugés trop petits pour être significatifs. Elle est maintenant adoptée, en partie grâce à une argumentation géologique toute simple : la subduction proposée par la tomographie se trouve exactement là où l'on pensait ; les études de surface ont en effet montré que des milliers de kilomètres de plaques océaniques du Pacifique se sont enfoncés sous le continent Nord-américain depuis plus de 150 millions d'années. Comme deux arguments indépendants vont dans le même sens, l'interprétation proposée est adoptée.

Ce type de raisonnement a été simultanément appliqué à toute la planète, et l'on a découvert la trace d'une multitude d'anciennes plaques enfoncées tout autour du Pacifique, depuis la Méditerranée jusqu'en Indonésie. La surface totale de toutes ces plaques retrouvées correspond probablement, et malgré les incertitudes, à plus de 50 millions de kilomètres carrés (100 fois la France!).

Tomographie et paléogéographie

On est désormais capable de reconstituer assez bien les modifications qui se sont produites à la surface de la planète depuis 150 millions d'années. Pour chaque époque, on sait où se trouvaient les grands continents et quelle était la forme des océans. On sait aussi à peu près où s'enfonçaient les grandes subductions océaniques autour du Pacifique et sur le bord Sud de l'Eurasie. Dans ces conditions, lorsque l'enfoncement d'un océan s'est produit pendant une longue période, on a une idée de la longueur de plaque enfoncée et de son âge. C'est ainsi que Stephen Grand a proposé que l'extrémité de la plaque Pacifique enfoncée sous l'Amérique du Nord était âgée d'environ 100 millions d'années. La géométrie de la plaque plongeante n'est, hélas pour l'entendement, pas toujours aussi simple. Il arrive que la plaque s'interrompe et soit relayée à plus grande profondeur par une plaque plus ancienne, dont l'origine reste incertaine. Enfin, lorsque plusieurs subductions se sont succédé sans avoir fonctionné longtemps, l'interprétation devient difficile.

Une toute nouvelle spécialité est née : elle consiste à repérer les plus importants tronçons de plaques enfoncées, à essayer d'avoir une idée de leur âge et à les raccorder aux grands déplacements

de plaques. Cet aspect de la tectonique des plaques, qui concerne des milliers de kilomètres de plaques perdues dans le manteau, est tout à fait nouveau.

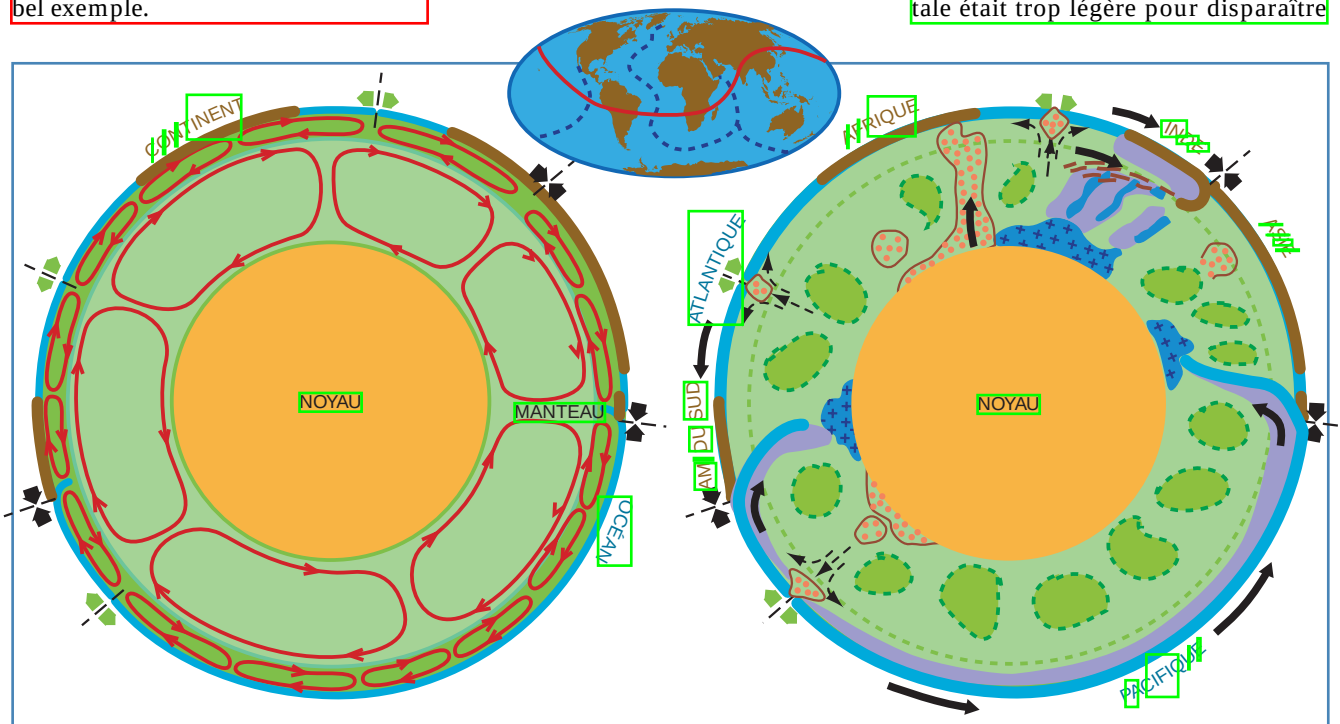
La prospection a commencé : la récente découverte de vieilles plaques océaniques, âgées de 150 millions d'années (Jurassique), qui se trouvent actuellement sous la Sibérie, en est un très bel exemple.

Tomographie et collision

La tomographie ayant montré que l'enfoncement de la lithosphère océanique est un phénomène majeur de la dynamique du manteau, on peut se demander ce qu'elle apporte sur le mécanisme de la collision, lorsque deux plaques

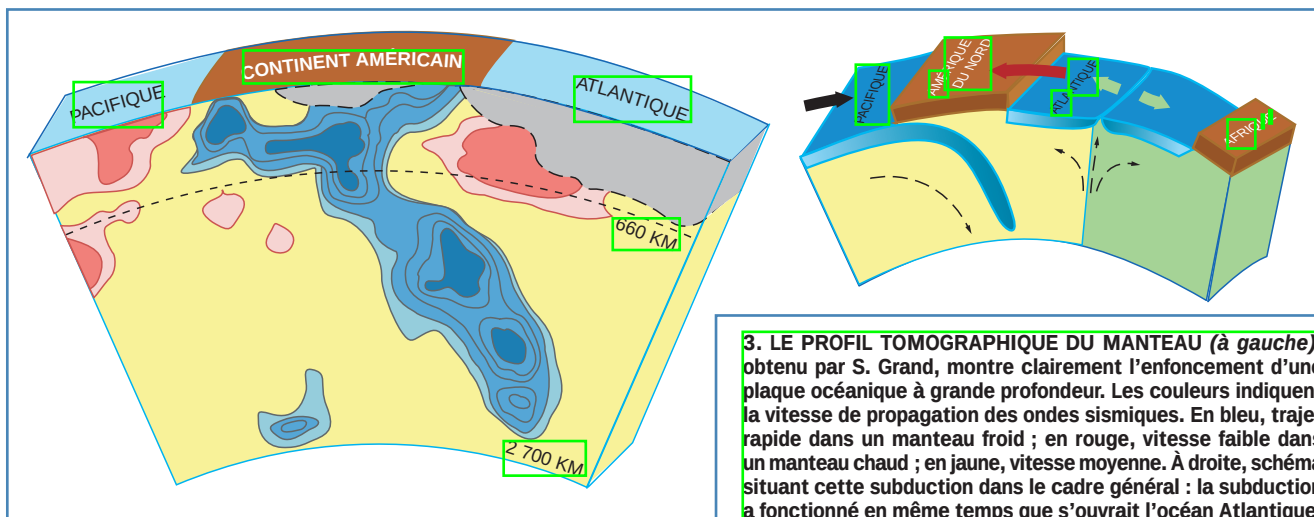
continentales s'affrontent et forment des chaînes de montagnes.

La question est importante, car la tectonique des plaques est née il y a 30 ans avec une règle (théorique) très simple : on pensait que l'arrivée d'un continent dans une zone de subduction bloquait le processus de convergence à cet endroit et que la croûte continentale était trop légère pour disparaître

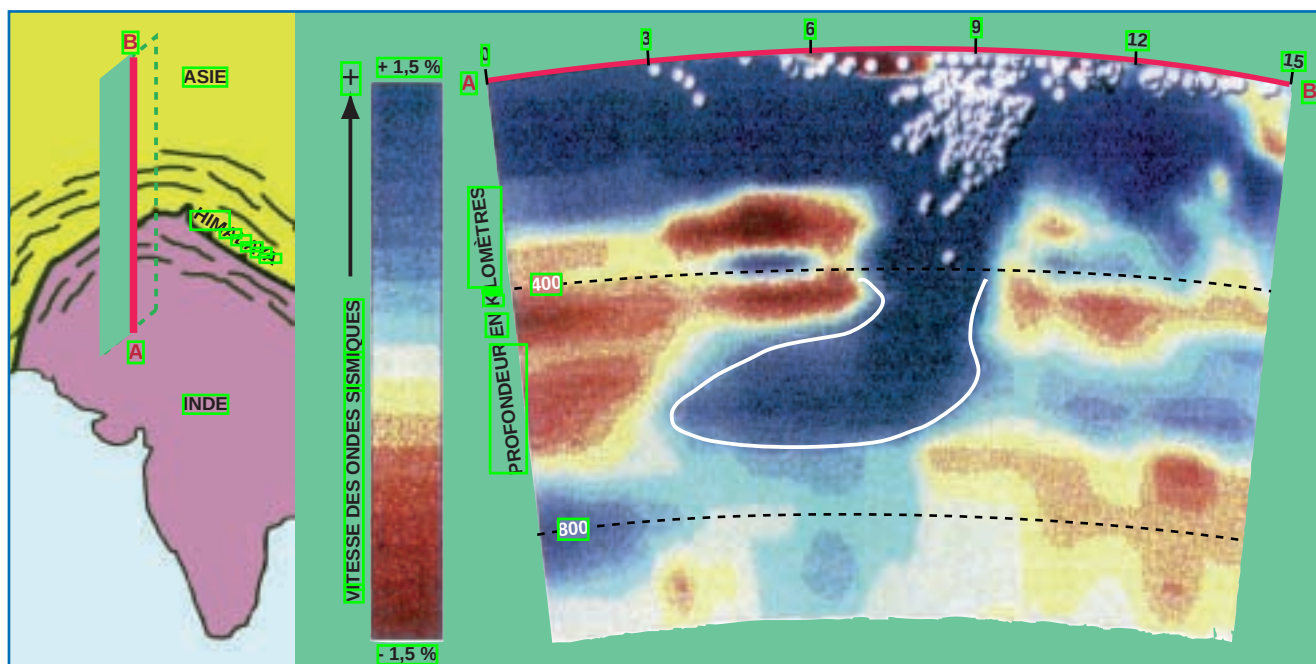


2. LA NOUVELLE STRUCTURE DU MANTEAU. Dans une des premières interprétations de la structure du manteau (à gauche), celui-ci était partagé en deux parties, avec des cellules de convection séparées dont la géométrie ne s'appuyait pas sur des observations. À droite, on a schématisé les conséquences de la tomographie sismique sur la tectonique des plaques. Les plaques océaniques sont en bleu, les plaques continentales en brun. On a localisé les zones d'écartement situées dans les rides océaniques et les zones comprimées correspondant aux chaînes de montagnes. Notez la grande simplicité des subductions océaniques, qui ont probablement été à l'origine des « cimetières de plaques » (croix sur fond bleu) qui se trouvent à la base du manteau ; on remarque la com-

plexité de la subduction continentale de l'Inde avec des tronçons de plaques océaniques bousculés et probablement renversés par l'avancée actuelle de l'Inde ; la couleur violette, située sous les plaques plongeantes est destinée à donner une idée de la véritable épaisseur du manteau en mouvement. On a représenté quelques zones chaudes (sphérules orange) ; celle située sous l'Afrique s'enracine à la limite du noyau. À l'écart des grands enfoncements de plaques, le manteau est probablement animé par des cellules convectives, mais aucun accord n'est encore réalisé sur leur géométrie. Un modèle récent propose l'existence d'un grand nombre de bulles (esquissées en pointillés verts sur la figure), lesquelles constitueraient le cœur des cellules de convection.



3. LE PROFIL TOMOGRAPHIQUE DU MANTEAU (à gauche), obtenu par S. Grand, montre clairement l'enfoncement d'une plaque océanique à grande profondeur. Les couleurs indiquent la vitesse de propagation des ondes sismiques. En bleu, trajet rapide dans un manteau froid ; en rouge, vitesse faible dans un manteau chaud ; en jaune, vitesse moyenne. À droite, schéma situant cette subduction dans le cadre général : la subduction a fonctionné en même temps que s'ouvrait l'océan Atlantique.



4. PROFIL TOMOGRAPHIQUE perpendiculaire à la partie Ouest de la chaîne himalayenne, montrant l'enfoncement de la plaque continentale de l'Inde. Cette figure de Harmen Bijwaard, est reproduite avec l'autorisation des auteurs. Cette coupe relativement superficielle a été complétée, vers le bas, jusqu'à plus de 2 000 kilomètres, par Van der Voo et al., 1999. Les taches blanches correspondent aux épicentres des gros séismes qui se sont produits depuis 40 ans dans la croûte terrestre, en réponse à l'avancée de l'Inde.

cielle a été complétée, vers le bas, jusqu'à plus de 2 000 kilomètres, par Van der Voo et al., 1999. Les taches blanches correspondent aux épicentres des gros séismes qui se sont produits depuis 40 ans dans la croûte terrestre, en réponse à l'avancée de l'Inde.

dans l'asthénosphère. Aussi les géologues pensaient-ils que les continents restaient en surface.

Cette règle a souvent été mise en doute, mais beaucoup continuent de l'utiliser. La tomographie vient d'apporter, là aussi, des données nouvelles dans la chaîne de l'Himalaya, qui est née de la collision entre l'Inde et l'Asie. On sait que là, le système ne s'est pas bloqué, car la collision s'est produite il y a 50 millions d'années, et l'avancée de l'Inde continue toujours après avoir fait surgir, outre l'Himalaya, le Pamir, le Kunlun, le Qilian Shan, le Tien-Shan...

Dans la partie Ouest de l'Himalaya, au Pakistan, la tomographie montre que la plaque indienne s'enfonce en profondeur, mais avec la géométrie représentée sur la figure 2. Dans la partie Nord de l'Inde et dans la chaîne de l'Himalaya, la géologie de surface et la distribution des séismes soulignent bien le plongement vers le Nord de la plaque indienne. Puis celle-ci se verticalise et finit par se renverser : près de 1 000 kilomètres de plaque continentale apparaissent dans le manteau...

Il s'agit là du premier exemple connu de subduction continentale, qui démontre que la vieille règle de la tectonique des plaques doit être abandonnée, et qui réhabilite, bien tard, une interprétation, il est vrai moins compliquée, proposée en 1927 par Émile Argand, dans *La tectonique de l'Asie*.

La dynamique de la subduction s'est ici modifiée au cours du temps. Des milliers de kilomètres de plaques océaniques se sont d'abord enfoncés selon le mode classique. La plaque continentale a suivi le mouvement, mais le système a dû se modifier progressivement pour aboutir, au bout de 50 millions d'années, à une situation actuelle originale. Le manteau supérieur s'est avancé vers le Nord, sur plus de 1 000 kilomètres, en bousculant et en renversant les plaques océaniques qui s'étaient enfoncées avant la collision.

Une véritable mégatectonique est en train de naître ; celle-ci envisage les phénomènes à l'échelle de plusieurs

milliers de kilomètres, aussi bien horizontalement que verticalement. On ne se contente plus d'étudier les « limites » de plaques, qu'elles soient convergentes ou divergentes. On aborde enfin les mécanismes à l'échelle de la planète... Et l'on voit déjà apparaître de grandes provinces caractérisées par des styles mégatectoniques différents. Bien que la subduction océanique intervienne dans les deux cas, la chaîne des Andes se distingue des cordillères Nord-américaines, et la subduction continentale de la plaque indienne est associée à une signature profonde tout à fait particulière et à de grands couissements des plaques dans le manteau.

La découverte de vieilles plaques au sein du manteau profond est toute récente. Les premiers chercheurs qui en ont fait état sont Stephen Grandt et ses collègues de l'Université du Texas, Rob Van der Hilst du MIT, Sri Widiyantoro, de l'Université de Canberra, Harmen Bijwaard et Win Sjakman, de l'Université d'Utrecht, avec Robert Engdahl, du Geological Survey à Denver, et Rob van der Voo, de l'Université du Michigan.

Maurice MATTAEU est professeur de géologie à l'Université de Montpellier.

H.C. NATAF, *Les entrailles de la Terre*, in *Revue du Palais de la découverte*, pp. 11-21, 1996.

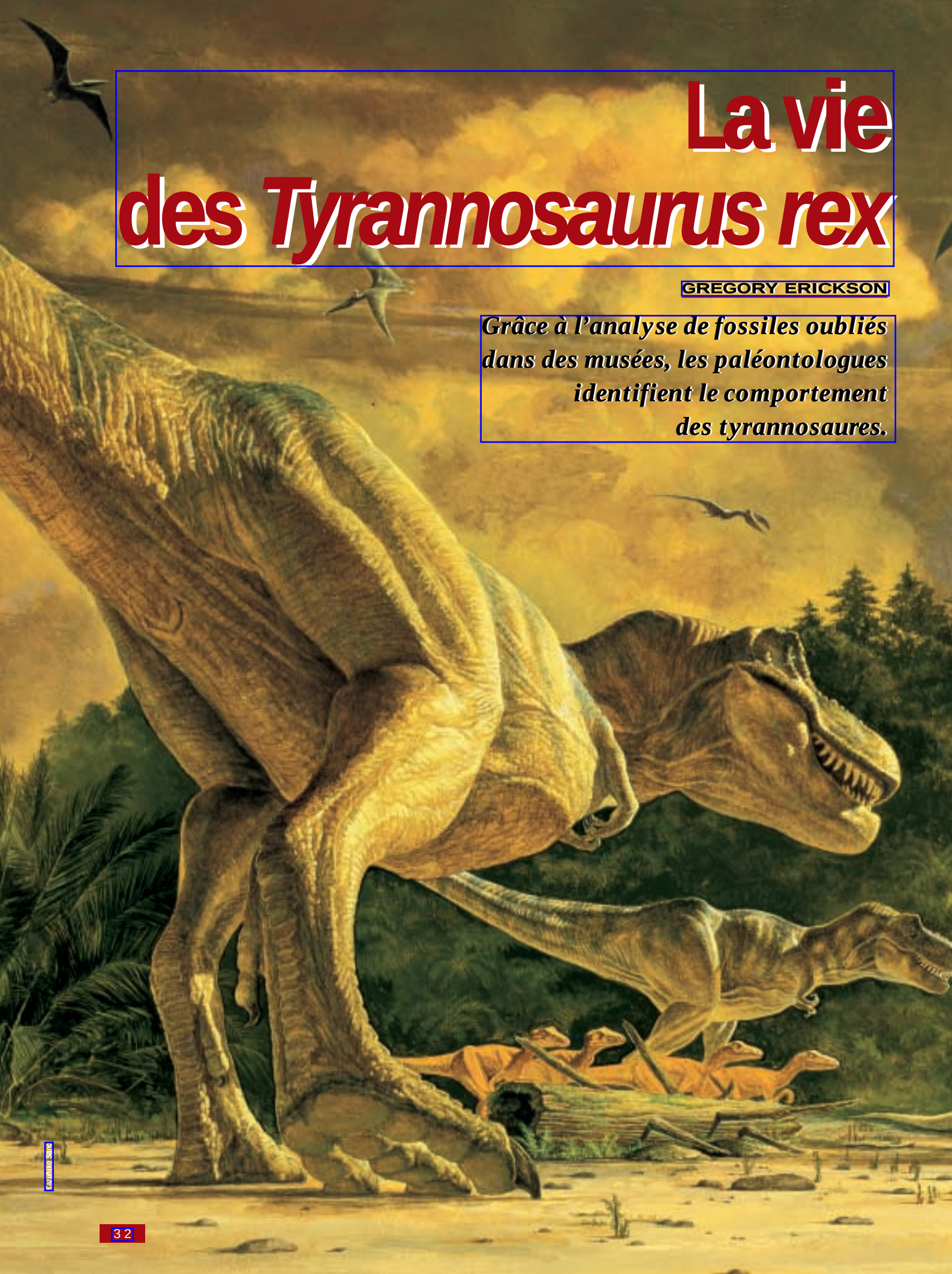
S. GRANDT et al, *Global Seismic Tomography : a Snapshot of Convection in the Earth*, in *GSA Today*, pp. 1-7, avril 1997.

R. VAN DER HILST et al, *Evidence for Deep Mantle Circulation from Global Tomography*, in *Nature*, vol. 386, pp. 578-584, avril 1997.

H. BIJWAARD et al., *Closing the Gap between Regional and Global Travel Time Tomography*, in *Journ. Geoph. Res.*, vol. 103, pp. 30055-30078, décembre 1998.

R. VAN DER VOO et al, *Tethyan Subducted Slabs under India*, in *Earth Plan. Sc. Lett.*, vol. 171, pp. 7-20, août 1999.

R. VAN DER VOO et al, *Mesozoic Subducted Slabs under Siberia*, in *Nature*, vol. 397, pp. 246-249, 29 janvier 1999.



La vie des *Tyrannosaurus rex*

GREGORY ERICKSON

*Grâce à l'analyse de fossiles oubliés
dans des musées, les paléontologues
identifient le comportement
des tyrannosaures.*



Disparus depuis 65 millions d'années, les dinosaures restent présents sur nos écrans et dans les chambres d'enfant. Parmi eux, le *Tyrannosaurus rex* – quatre tonnes et demie – est la vedette de ce bestiaire mi-réal, mi-mythique.

Selon le paléontologue Stephen Jay Gould, de l'Université Harvard, le nom de chaque espèce est une théorie sur l'animal en question : *Tyrannosaurus rex*, *T. rex* pour les intimes, est le «roi des lézards tyrans».

1. UN *TYRANNOSAURUS REX* repousse des congénères attirés par sa proie : un *Triceratops*. De petits troodons et des ptérosaures, qui tournoient dans le ciel, attendent les restes de son repas.

Dans les films et dans les représentations populaires, *T. rex* est une machine à tuer, agressive, assoiffée de sang, obnubilée par l'attaque de proies sans défense : cette idée est un amalgame d'imagination et d'études scientifiques. Un siècle d'étude et 22 fossiles presque complets de *T. rex* ont fourni beaucoup d'informations sur son anatomie. Cependant, le comportement se déduit difficilement de l'anatomie : était-il un prédateur ou un charognard ? La question lancine les paléontologues.

Solitaire ou grégaire ?

Depuis dix ans, des paléobiologistes explorent ce type de questions, cherchant à faire revivre les squelettes immobiles et silencieux des musées. Ils étudient non plus l'anatomie, mais les groupes de squelettes de nombreux individus, afin d'élucider les interactions des *T. rex* entre eux et avec les autres espèces. Ils traquent les traces fossiles de comportements, telles les marques de morsure sur les os, les types d'usure des dents et les coprolithes (des matières fécales fossilisées) afin d'obtenir des preuves concrètes d'activités biologiques jusqu'à aujourd'hui inconnues.

Les paléobiologistes supposent notamment que les espèces étroitement apparentées avaient des comportements analogues. Dans cette hypothèse, ils rapprochent les données concernant *T. rex* de celles des représentants plus anciens de la famille des tyrannosauridés, notamment leurs cousins du groupe des albertosaures, tels *Albertosaurus*, *Gorgosaurus* et *Daspletosaurus*.

Alors que les tyrannosaures sont souvent représentés comme des animaux solitaires, des traces fossiles indiquent qu'ils avaient un comportement grégaire, au moins pendant une partie de leur vie : au Montana, deux gisements paléontologiques d'où ont

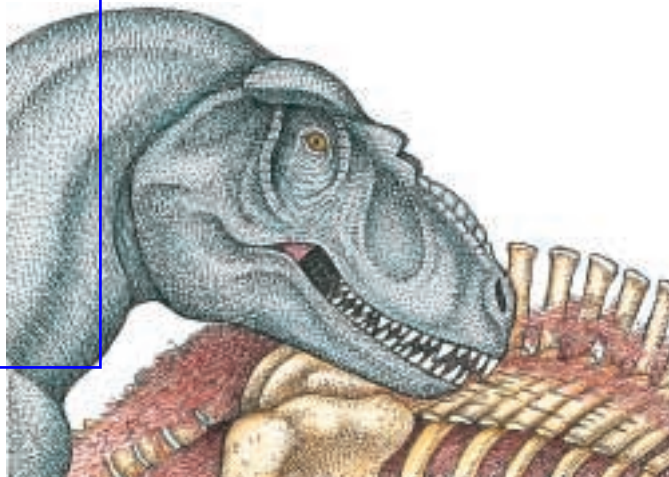
été extraits des fossiles de *T. rex* sont très convaincants.

Ainsi, en 1966, des chercheurs du musée de Los Angeles mettaient au jour un fossile de *T. rex* adulte sur le site de la Grotte de l'enfer, quand ils trouvèrent un second spécimen, adjacent au premier. Ils crurent à une espèce différente, plus petite, mais mes analyses de la microstructure osseuse ont montré que l'animal était un jeune *T. rex* (voir la figure 4). Une découverte analogue eut lieu lors de l'extraction de Sue, le fossile de *T. rex* le plus grand, le plus complet et le plus célèbre (pour son adjudication à 50 millions de francs, dans une vente publique à New York, en 1998) : les restes d'un deuxième adulte, d'un jeune et d'un *T. rex* nouveau-né ont été mis au jour dans la même carrière. Il y a peu de chances que plusieurs *T. rex* solitaires soient morts séparément au même endroit ; ils appartenaient sans doute à un même groupe social.

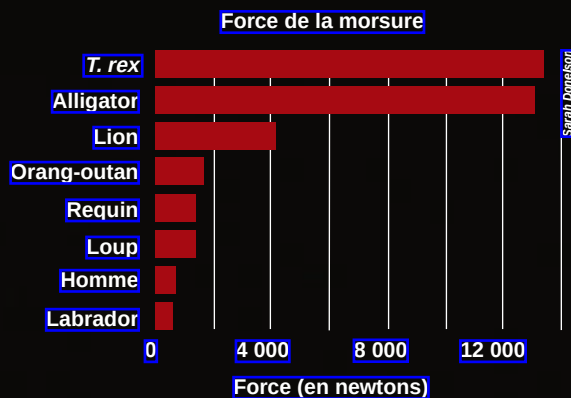
Une autre découverte beaucoup plus ancienne corrobore l'hypothèse : en 1910, dans l'Alberta, des paléontologues du musée d'histoire naturelle de New York ont découvert au moins neuf *Albertosaurus* dans une couche de sédiments très riche en ossements. Récemment, Philip Currie et ses collègues du musée de paléontologie Royal Tyrrell ont retrouvé le site de cette découverte et ont entrepris l'étude minutieuse de cet assemblage. De tels assemblages d'animaux carnivores apparaissent parfois quand ils sont piégés successivement, par exemple dans de la boue ou dans des sables mouvants, au bord d'une rivière : une proie déjà prisonnière cause leur perte. En l'occurrence, l'absence de restes d'un herbivore parmi les albertosaures, ainsi que dans le groupe auquel appartenait Sue, indique que les deux meutes ont plutôt péri de sécheresse, de maladie ou de noyade.

Les animaux étudiés par P. Currie mesuraient quatre à neuf mètres de longueur : le groupe comprenait des adultes et des jeunes. L'un des individus est beaucoup plus grand et plus robuste que les autres. Il pourrait appartenir à une espèce différente, mais je pense qu'il était plutôt le mâle ou la femelle dominant du groupe.

Grégaires plutôt que solitaires, les tyrannosaures étaient néanmoins très agressifs : des marques de morsures en partie cicatrisées révèlent des relations tendues entre les membres du groupe. P. Currie et Darren Tanke, spécialiste de paléopathologie, ont découvert que *T. rex* et ses cousins infligeaient un type caractéristique de morsure : le museau des proies, ainsi que le sommet ou l'arrière du crâne comportent des lacerations. Apparemment, *T. rex* mordait avec les dents latérales plutôt qu'avec l'avant de la mâchoire. La présence de marques caractéristiques sur les fossiles de *T. rex* eux-mêmes montre que ces dinosaures se battaient ; les combattants maintenaient



2. AVEC LEURS DENTS DE DEVANT, les *T. rex* grignotaient (en haut) des lambeaux de chair dans des endroits étroits, tels les espaces intervertébraux. Cependant, les *T. rex* mordaient également avec leur mâchoire entière pour arracher des pans entiers de carcasse qu'ils déchiquetaient ensuite (en bas).



3. GRACE A LEUR ENORME CORPS et à la puissante musculature de leur cou, les T. rex pouvaient arracher le bassin d'un tricératops et y laisser de profonds sillons (cartouche en bas à droite). Le test d'un moulage d'une dent de T. rex sur des bassins de vaches montre qu'il mordait plus puissamment que n'importe quel animal actuel (en haut à droite).

leur tête au même niveau pendant l'affrontement. L'importance de certaines blessures fossiles montre que les *T. rex* s'infligeaient parfois de graves blessures. L'un des spécimens étudiés a même la dent d'un adversaire fichée dans la mâchoire.

Tout au long de leur vie, les *T. rex* luttèrent pour s'approprier les partenaires sexuels ou le territoire. Les blessures des jeunes semblent plus courantes que celles des adultes : les jeunes étaient-ils attaqués à la fois par d'autres jeunes et par des adultes ? Ou bien les jeunes *T. rex* décédaient-ils plus souvent de leurs blessures que les adultes, qui cicatrisaient et ne gardaient pas de traces de leurs combats de jeunesse ?

Morsures et morceaux

Les gueules des babouins ou des tigres sont effrayantes, alors qu'elles n'ont que quatre canines. Imaginez maintenant une gueule garnie uniquement de dents en forme de poignard d'environ 20 centimètres de longueur, aux bords crénelés !

Avant 1990, on connaissait peu de marques de morsures par des *T. rex* : les quelques descriptions publiées étaient brèves et noyées dans la présentation de découvertes plus importantes ; les indices sur le comportement des *T. rex* avaient souvent échappé à l'étude. Quelques paléontologues seulement se sont intéressés aux dents des tyrannosaures.

En 1973, le paléontologue australien Ralph Molnar a étudié la force des dents d'après leur forme. Puis les Américains James Farlow et Daniel Brinkman ont

analysé la morphologie des dents du tyrannosaure : en raison de leur section en amande, les dents de *T. rex* étaient solides et capables de percer des os épais.

En 1992, le paléontologue amateur Kenneth Olson m'a soumis plusieurs spécimens, dont le bassin incomplet d'un *Triceratops* adulte de un mètre de largeur et de 1,5 mètre de longueur, et la phalange d'un *Edmontosaurus* adulte (un dinosaure à bec de canard) : les deux os sont criblés de rainures et de trous mesurant jusqu'à 12 centimètres de longueur et plusieurs centimètres de profondeur. Le bassin du *Triceratops* présente près de 80 marques. L'espacement des traces (dix centimètres environ), leur section en amande et l'empreinte de carènes – les bords très coupants et crénelés – sur les faces antérieures et postérieures de ces marques indiquent que les dents à l'origine de ces marques sont celles d'un *T. rex*.

On sait ainsi que *T. rex* se nourrissait de ses deux contemporains les plus courants, *Triceratops* et *Edmontosaurus*. De plus, *T. rex* mordait de deux façons : soit il perçait les chairs avant de reculer la tête pour arracher la viande, soit il utilisait ses dents de devant pour attraper et dilacérer la chair dans les espaces étroits où seul pouvait accéder le museau de la bête (voir la figure 2). Cette dernière méthode laisse sur l'os des sillons verticaux et parallèles.

Nombre de morsures sur le bassin du tricératops étaient espacées de quelques centimètres seulement, indiquant que le *T. rex* avait méthodiquement grignoté son morceau de

viande. À chaque morsure, le *T. rex* avait également arraché de petites esquilles d'os, qui ont été partiellement digérées.

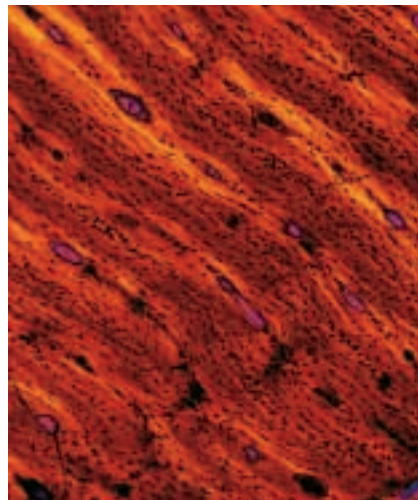
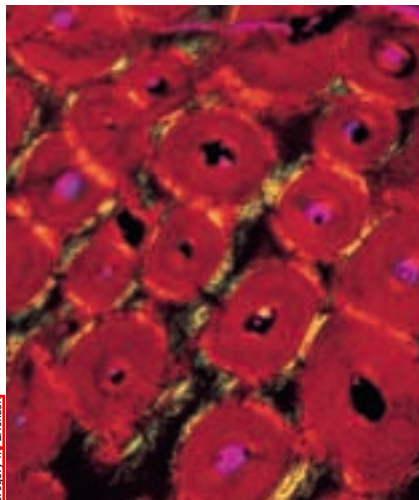
En 1997, ma collègue Karen Chin a confirmé cette description quand elle a analysé le premier coprolithe attribué avec certitude à un *T. rex* (voir la figure 5). D'un poids de 7,1 kilogrammes et d'une longueur de 44 centimètres, ce coprolithe découvert au Canada était plein d'éclats osseux. Grâce à des méthodes histologiques, K. Chin et moi avons établi que les fragments osseux provenaient d'un jeune dinosaure herbivore. Les *T. rex* ingéraient donc des morceaux d'os de leurs proies et ils les digéraient en partie grâce à de puissantes enzymes ou à des acides gastriques.

Malgré le manque de spécimens, K. Olson et moi avons supposé que *T. rex* laissait vraisemblablement d'innombrables marques de morsures. L'absence de preuve n'est pas opposée à cette hypothèse : d'une part, les paléontologues n'ont jamais recherché les empreintes de dents de façon systématique ; d'autre part, les collectionneurs et les musées recherchent les squelettes complets plutôt que des morceaux isolés. Or, les squelettes complets sont souvent ceux d'animaux décédés de mort non violente, rapidement ensevelis et protégés des charognards.

Aase Jacobsen, du musée Royal Tyrrell, a récemment testé cette explication en comparant des fragments de squelettes isolés avec des squelettes presque complets : 14 pour cent des os isolés portent des traces de morsures d'animaux du type des tyrannosaures, contre seulement quatre pour cent des restes plus complets.

Certaines caractéristiques du tyrannosaure, tels sa couleur, son cri ou sa parade nuptiale, resteront probablement inconnues, mais leur comportement alimentaire est accessible grâce aux fossiles. Ces derniers nous ont permis de réexplorer la grande question des années 1980 : *T. rex* était-il un prédateur ou un charognard ?

Lors de sa découverte, il y a un siècle, les paléontologues ont immédiatement supposé qu'il était un prédateur. Toutefois, des griffes acérées et une mâchoire puissante ne sont pas l'apanage des prédateurs. Par exemple, la plupart des ours sont omnivores et ne tuent qu'une petite proportion de leur nourriture. En 1917, après avoir remarqué que les dents d'un crâne incomplet d'albertosaure se



4. LA MICROSTRUCTURE DES OS DE DINOSAURES révèle l'âge des animaux. Les os des individus âgés présentent des tubes osseux, nommés canaux haversiens (*grands cercles, à gauche*), qui ont remplacé les microfractures des os moins organisés des jeunes (*à droite*).

détachaient assez facilement, le paléontologue canadien Lawrence Lambe proposa que les tyrannosaures se nourrissaient de charognes en putréfaction (des recherches ont ensuite montré que 40 pour cent des dents perdues par les tyrannosaures sont très usées et cassées. Selon mes estimations du rythme de remplacement dentaire, ces dégâts ont eu lieu pendant une période d'environ deux ou trois ans). Dans le débat «prédateur» contre «charognard», où les arguments concernent l'anatomie et les capacités physiques des *T. rex*, L. Lambe soutenait ainsi l'opinion peu partagée que les tyrannosaures étaient des «vautours» terrestres géants.

Faucon ou vautour?

Les partisans du comportement charognard ont mis en avant une «théorie de la fragilité dentaire» : les longues dents de *T. rex* n'auraient pas résisté à des attaques de proies vivantes ; les minuscules bras et la lenteur de *T. rex* l'auraient empêché d'attaquer ses proies.

Les partisans du comportement prédateur opposent des données biomécaniques variées : non seulement les dents de *T. rex* étaient plus solides qu'on ne l'avait imaginé, mais les bras «frères» du *T. rex* soulevaient jusqu'à 180 kilogrammes ; d'après les proportions des membres, on estime que les *T. rex* couraient à des vitesses atteignant 47 kilomètres par heure, soit plus vite que n'importe lequel de ses contemporains. Toutefois, on ne sait rien de son endurance ni de son agilité.

Le débat reste ouvert. La question exacte est de savoir dans quelles proportions *T. rex* utilisait les animaux vivants et morts de son environnement ? Des prédateurs tels les lions sont aussi des charognards occasionnels, et les charognards typiques, tels que les vautours, tuent parfois leur proie. Apparemment, les tyrannosaures étaient à la fois des chasseurs et des charognards.

Dans l'ancienne aire de répartition de *T. rex*, des couches riches en fossiles contiennent des restes de centaines, voire de milliers d'edmontosaures qui ont succombé à des inondations, à des sécheresses ou à des événements autres que la prédation. Sur ces fossiles, des



5. CE GRAND COPROLITHE (des matières fécales fossilisées) de 44 centimètres de longueur est le plus gros connu pour un carnivore. D'après sa taille, son âge, son contenu et son origine géographique, un tyrannosaure et, très certainement un *T. rex*, est son producteur.

traces de morsures et des dents perdues attestent le comportement charognard du *T. rex*. Néanmoins, K. Carpenter a également apporté de solides preuves d'un comportement prédateur : il a analysé le fossile d'un edmontosaure adulte qui a survécu à l'attaque d'un *T. rex*, avec plusieurs vertèbres caudales cassées, qui ont ensuite cicatrisé. Seul le *T. rex* était assez grand et assez puissant pour infliger une telle blessure. La quantification des traces fossiles indiquera la part de prédation de *T. rex*.

Des traces d'une préférence pour des proies moins dangereuses ou plus faciles à capturer seraient aussi en faveur d'un comportement prédateur, tandis que des traces d'une consommation indistincte des autres animaux révéleraient un comportement charognard. Grâce à des milliers d'os de dinosaures provenant de l'Alberta, A. Jacobsen et D. Tanke ont observé que les hadrosaures, dépourvus d'armure protectrice, présentent deux fois plus de traces de morsures que les cératopsiens, armés de cornes ; d'autre part, aucune trace de morsures n'a été trouvée sur les ankylosaures, lourdement caparaçonnés.

Cependant, dans son étude, la plupart des os des hadrosaures proviennent d'individus isolés, tandis que la plupart des cératopsiens ont été découverts dans des couches riches en squelettes complets : leurs cadavres ont peut-être été dépecés par des *T. rex* charognards. L'étude de cératopsiens isolés s'impose. De plus, l'analyse d'autres traces de morsures qui témoignent de tentatives de capture avortées indiquerait aussi la préférence, motivée par la prudence,

pour des proies moins récalcitrantes.

Selon A. Jacobsen, le cannibalisme était rare chez les *T. rex*. Seulement deux pour cent des os d'albertosaures portent des marques de morsures contre 14 pour cent des os d'herbivores. Ces découvertes sont également en faveur d'un comportement prédateur plutôt que charognard : les os de *T. rex* devraient présenter autant de marques de morsures que les os d'herbivores, puisqu'un *T. rex* charognard, de surcroît grégaire, n'aurait pas négligé les restes d'un congénère fraîchement décédé.

Les études histologiques des os découverts dans les coprolithes fournissent approximativement l'âge des victimes : les *T. rex* préféraient les membres vulnérables du troupeau, tels les très jeunes. Ce résultat plaide aussi pour un comportement prédateur, puisqu'un charognard aurait un régime alimentaire plus homogène.

Au total, il aura fallu un siècle pour que les paléontologues obtiennent une image fidèle de *Tyrannosaurus rex*. La description de ses mœurs impose un réexamen des anciennes découvertes délaissées. Grâce aux nouvelles techniques, nous décrypterons peut-être les informations apportées par des fossiles que nous estimions jusqu'à maintenant de peu de valeur.

Gregory ERICKSON est paléontologue à l'Université de Stanford.

Jean-Guy MICHARD, *Le monde perdu des dinosaures*, Éditions Gallimard, 1989.

Gregory M. ERICKSON, *Incremental Lines of von Ebner in Dinosaurs and the Assessment of Tooth Replacement Rates Using Growth Line Counts*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 93, n° 25, pp. 14623-14627, 10 décembre 1996.

Karen CHIN, Timothy T. TOKARYK, Gregory M. ERICKSON et Lewis C. CALK, *A King-Sized Theropod Coprolite*, in *Nature*, vol. 393, pp. 680-682, 18 juin 1998

Rob DESALLE et Daniel LINDLEY, *Comment fabriquer un dinosaure : la science de Jurassic Park*, Éditions du Seuil, 1999.

Collectif, *Le Tyrannosaure*, Marshall Cavendish, 1999.

Les dents des tyrannosaures

WILLIAM ABLER

Les dents des tyrannosaures révèlent les habitudes prédatrices et alimentaires de ces animaux.

La détermination des habitudes prédatrices et du comportement alimentaire des tyrannosaures nécessite une analyse de leurs dents. La dent de tyrannosaure ressemble à un cône, incurvé et aplati, dont la section est en forme d'amande. De nombreux paléontologues qui ont étudié les petites aspérités, nommées denticules, des arêtes antérieures et postérieures des dents ont supposé que celles-ci coupaient la viande à la manière d'un couteau à dents. Afin de tester cette analogie, nous avons étudié différents types de couteaux et l'influence des denticules sur la découpe de la viande.

Nous avons supposé que

les dents des tyrannosaures étaient bien adaptées à leurs fonctions. Néanmoins, les expériences sur les dents elles-mêmes, qui semblent être le meilleur moyen de découvrir leurs caractéristiques, ne sont pas rigoureuses. Par exemple, on ne peut modifier la hauteur des denticules pour suivre l'évolution du tranchant de la dent. Nous avons donc étudié des lames d'acier dont nous variaions la dentelure et le tranchant, pour ensuite les comparer aux dents de tyrannosaure.

Le fil d'un couteau est lisse ou dentelé. Une lame lisse est définie par l'angle formé par les deux faces et par le rayon de courbure de la lame du côté tranchant : plus ce rayon est petit, plus le couteau est coupant. Les lames dentelées sont caractérisées par la hauteur des dents et par leur espacement.

Lisse ou crénelé ?

J'ai ainsi créé, d'une part, une série de couteaux à lame lisse, avec différents angles entre les faces, mais avec un même rayon de courbure et, d'autre part, une série de couteaux à dents. Les lames étaient montées sur une scie de boucher, actionnée par des cordes et des poulies qui déplaçaient la lame sur des morceaux de viande identiques, disposés sur une planche à découper (voir la figure 2). Avec des poids placés à l'extrémité des cordes, j'ai mesuré les forces nécessaires pour couper chaque morceau de viande à la même profondeur.

La lame dentelée coupe la viande parce que chaque dent pénètre dans la

viande à une profondeur égale à sa longueur, et isole ainsi un petit morceau entre deux dents consécutives ; lorsque la lame se déplace, chaque dent déchire cette partie isolée. La lame, qui descend à nouveau et répète les mêmes étapes, transforme donc une force de traction en une force de coupe.

En revanche, une lame lisse concentre la force vers le bas, sur le fil : plus ce bord est mince, plus la pression est importante pour une même force. Le fil écrase la viande jusqu'à ce qu'elle se fende, et les déplacements de la lame réduisent les frottements entre la surface de la lame et la viande.

J'ai ensuite étudié différentes dents crénelées avec le même dispositif expérimental : la dent crénelée d'un requin fossile (*Carcharodon megalodon*) fonctionne exactement comme une lame de couteau à dents. En revanche, une dent de tyrannosaure coupe la viande comme une lame de couteau lisse. Or, les denticules, même dissemblables, sont une caractéristique importante de la dent de tyrannosaure. Ces denticules ont-ils une autre fonction que celle de trancher ?

Sur une dent de requin, les denticules ont une forme pyramidale, tandis que ceux de tyrannosaure sont cubiques. Pour comprendre le rôle des espacements entre les denticules, nommés cellae, et des minces fentes, les diaphyses, qui prolongent verticalement les cellae, j'ai coupé de la viande avec une dent de tyrannosaure. Pour la première fois depuis 65 millions d'années, une dent de tyrannosaure tranchait de la chair fraîche !

Le microscope révèle que les cellae piègent la graisse et les autres débris alimentaires, tandis que les diaphyses, plus profondes, retiennent des filaments

1. DE LA DENT MASSIVE d'un tyrannosaure, seule 20 pour cent de la dent émergeait des gencives (la partie lisse en haut à gauche).



2. DANS LE DISPOSITIF DE MESURE du tranchant de différentes lames d'acier, des poids fixés à des cordes sur les côtés et au centre provoquent une coupure de dix millimètres dans un échantillon de viande (représenté ici par la gomme verte).



3. CET AGRANDISSEMENT d'une dent de tyrannosaure montre des filaments de tendons piégés dans les diaphyses entre chaque denticule.

de tendons de la victime. Piégés pendant de longues périodes, ces débris de viande et de graisse hébergeaient des bactéries pathogènes : une morsure de tyrannosaure, si elle n'était pas immédiatement fatale, était probablement la source d'une infection mortelle.

D'autre part, les denticules voisins ne se rejoignent qu'à l'intérieur de la dent, à une profondeur égale à la hauteur externe du denticule. Le point de rencontre, nommé ampoule, en forme de fiole plutôt qu'en forme de V, empêche la dent de se briser lorsqu'elle est soumise à une forte pression : alors que les diaphyses étroites exercent une forte pression sur les filaments de tendon pour les garder piégés, l'ampoule arrondie répartit la pression sur toute sa surface et évite ainsi la concentration des forces en un point qui risquerait de provoquer une fracture.

Préserver par les ampoules, les dents des tyrannosaures fonctionnaient moins comme des couteaux que comme des crampons qui maintenaient la nourriture pendant que le *T. rex* l'arrachait. L'absence de surface d'occlusion et les rares contacts entre les dents

montrent que les *T. rex* ne mâchaient pas leur nourriture, mais avalaient plutôt les gros morceaux de chair d'un seul coup.

Rougies par le sang !

La comparaison avec des carnivores vivants pouvait-elle éclairer la biologie alimentaire de *T. rex*? L'herpétologue Walter Auffenberg, de l'Université de Floride, a étudié le plus gros lézard du monde, le varan de Komodo (voir *Le dragon de Komodo*, par Claudio Ciofi, *Pour la Science*, mai 1999), qui semble être un bon modèle du tyrannosaure. Le dragon de Komodo, dont les dents ressemblent remarquablement à celles du tyrannosaure, inflige des morsures qui infectent la victime quand elle s'échappe : un animal rescapé ne vit pas longtemps quand il est blessé. Infligeant des morsures de ce type, les tyrannosaures semblent avoir été des prédateurs. La victime des attaques initialement manquées était attrapée par l'animal responsable de la blessure ou par un congénère.

Une flore buccale pathogène nécessite un environnement humide : les tyrannosaures avaient probablement des lèvres étroitement fermées, ainsi que des gencives épaisses et spongieuses qui couvraient leurs dents. Quand les tyrannosaures mangeaient, la pression entre les dents et les gencives provoquaient sans doute des saignements qui nourrissaient les bactéries dentaires pathogènes. Pendant les repas, la monstrueuse mâchoire des tyrannosaures était rougie par deux sangs différents !

William ABLER travaille au Département de géologie du musée Field, à Chicago.

William ABLER, *The Serrated Teeth of Tyrannosaurid Dinosaurs and Biting Structures in Other Animals*, in *Paleobiology*, vol. 18, n° 2, pp. 161-183, 1992.

William ABLER, *Tooth Serrations in Carnivorous Dinosaurs*, in *Encyclopedia of Dinosaurs*, sous la direction de Philip J. Currie et Kevin Padian, Academic Press, 1997.

La réparation de la moelle épinière

JOHN MCDONALD

*Les lésions de la moelle épinière semblaient naguère irréparables.
Des données nouvelles redonnent l'espoir à certaines personnes paralysées.*

Lors d'un entraînement aux rencontres sportives internationales de Goodwill, en 1998, le gymnaste chinois Sang Lan tombe sur la tête et reste paralysé. Pendant un match, le joueur de football américain Dennis Byrd heurte un autre joueur et ne peut se relever. Une chute, un accident de voiture, un choc provoquent des paralysies, parce qu'ils lèsent la moelle épinière. Quelle qu'en soit la cause, une lésion grave de la moelle épinière se manifeste souvent par une paralysie totale ou partielle des membres et par la perte de toute sensibilité de l'organisme au-dessous de la lésion.

Depuis une trentaine d'années, les médecins s'efforçaient de stabiliser la colonne vertébrale pour éviter le déplacement osseux et l'extension des lésions médullaires, prévenaient et traitaient les infections ; ils prescrivait des séances de rééducation pour aider les malades à optimiser leurs capacités résiduelles. Naguère, toutes ces personnes mouraient de complications infectieuses dans les mois qui suivaient l'accident. Aujourd'hui, leur durée de vie est similaire à celle de la population générale. Quand la lésion de la moelle épinière était grave, on n'avait aucun espoir de guérison, car, contrairement aux tissus du système nerveux périphérique, ceux du système nerveux central (la moelle épinière et le cerveau) ne se réparent pas spontanément. Pourtant, quelques observations récentes font espérer qu'un jour, peut-être, la médecine disposera de moyens pour réparer la moelle épinière.

En 1990, un essai clinique international a révélé qu'un corticostéroïde, la méthylprednisolone, préserve une

partie des fonctions sensorielles et motrices quand on l'administre à hautes doses au cours des huit heures qui suivent l'accident. Pour la première fois, un traitement semblait minimiser les conséquences d'un traumatisme de la moelle épinière. Les améliorations étaient limitées, mais ce résultat stimula la recherche de nouveaux traitements. Depuis, de nombreux médecins et biologistes ont étudié pourquoi les lésions s'étendent dans les heures suivant l'accident et pourquoi le tissu endommagé ne se répare pas ; ces recherches vont ouvrir de nouvelles voies thérapeutiques.

Les progrès rapides de nos connaissances devraient aider les personnes atteintes de lésions de la moelle épinière à récupérer un usage au moins partiel de leurs membres. Simultanément, on continue à chercher des moyens pour compenser les paralysies plutôt que des moyens visant à réparer les lésions. Au cours des deux dernières années, par exemple, les autorités sanitaires de plusieurs pays ont homologué des dispositifs activant électriquement les muscles par des fils implantés. L'un d'eux déclenche des mouvements de la main (qui permet, par exemple, de saisir une tasse ou un crayon) chez des personnes qui ont conservé la mobilité des épaules ; l'autre restaure un contrôle des sphincters de la vessie et du rectum.

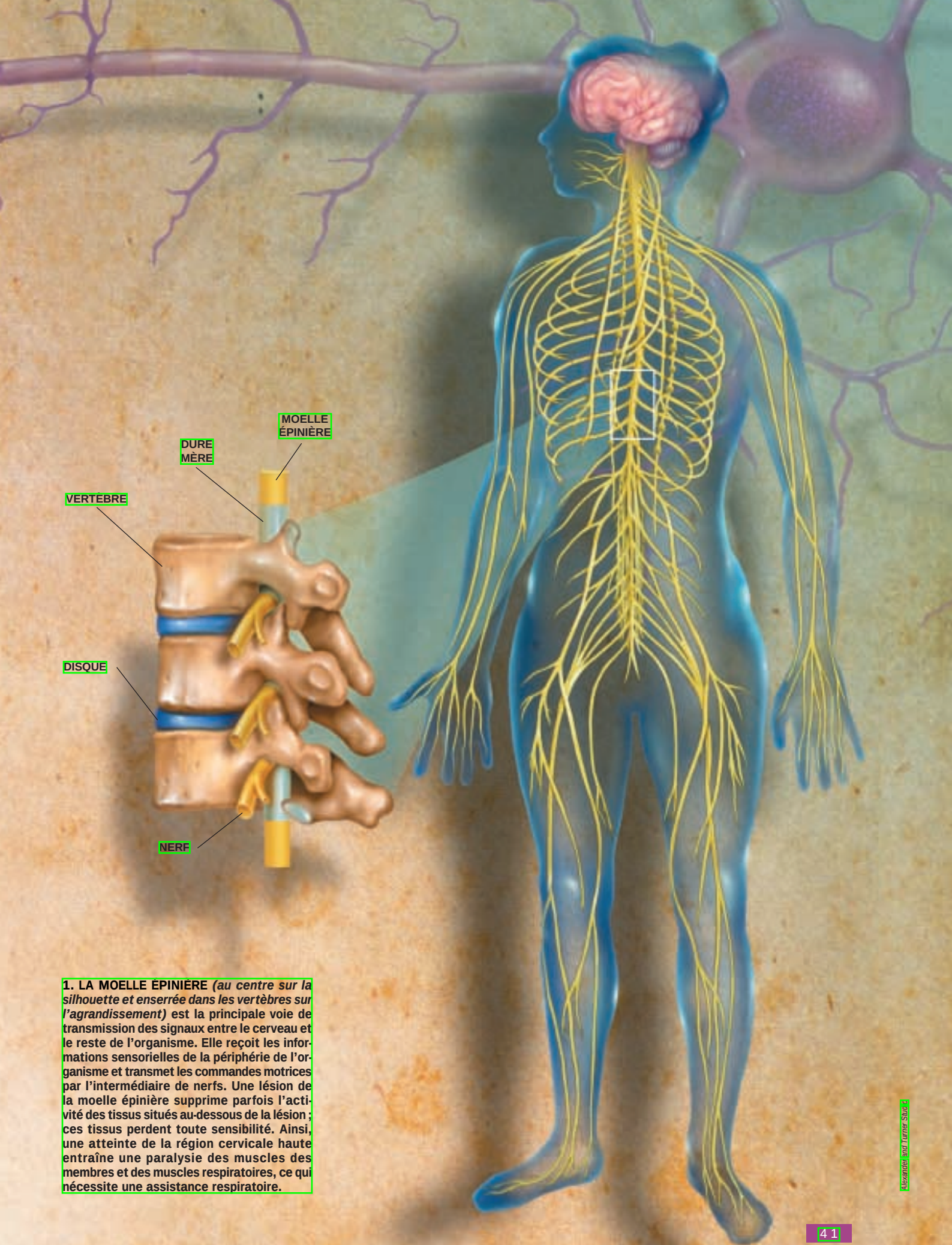
Les chirurgiens ont également mis au point des techniques pour restituer la capacité de préhension : ils identifient les tendons qui relient les muscles paralysés de l'avant-bras aux os de la main, les déconnectent et les relient aux muscles du bras commandés par des zones de la moelle

épinière situées au-dessus de la lésion (c'est-à-dire toujours sous contrôle volontaire). De surcroît, des études réalisées sur l'animal ont indiqué qu'une rééducation précoce, qui met les membres en action dès que la lésion osseuse est stabilisée, améliore les fonctions motrice et sensorielle des membres.

Le fonctionnement de la moelle épinière

La moelle épinière mesure moins de deux centimètres et demi de diamètre, mais c'est la voie de communication du cerveau avec le reste de l'organisme. Elle contient les neurones, des cellules constituées d'un corps cellulaire renflé, de ramifications, les dendrites, qui détectent les signaux, et d'un prolongement du corps cellulaire, l'axone, qui transmet les signaux aux cellules voisines. Les axones, ramifiés à leur extrémité, établissent des connexions, ou synapses, avec plusieurs neurones. Certains se prolongent sur toute la longueur de la moelle épinière.

La moelle, molle et gélatineuse, contient deux systèmes de neurones et d'axones. Les uns, constituant les voies motrices descendantes, commandent les muscles lisses des organes internes et les muscles striés ; ils modulent également les actions du système nerveux autonome, qui contrôle la pression artérielle, la température corporelle et les réactions vasculaires de l'organisme au stress. Les voies descendantes partent de neurones dont les corps cellulaires sont dans le cerveau ; elles transmettent leurs signaux électriques vers différents «étages» de la moelle épinière. Les neurones de ces différents



1. LA MOELLE ÉPINIÈRE (au centre sur la silhouette et enserrée dans les vertèbres sur l'agrandissement) est la principale voie de transmission des signaux entre le cerveau et le reste de l'organisme. Elle reçoit les informations sensorielles de la périphérie de l'organisme et transmet les commandes motrices par l'intermédiaire de nerfs. Une lésion de la moelle épinière supprime parfois l'activité des tissus situés au-dessous de la lésion ; ces tissus perdent toute sensibilité. Ainsi, une atteinte de la région cervicale haute entraîne une paralysie des muscles des membres et des muscles respiratoires, ce qui nécessite une assistance respiratoire.

étages transmettent ensuite l'influx nerveux vers la périphérie (les muscles des membres).

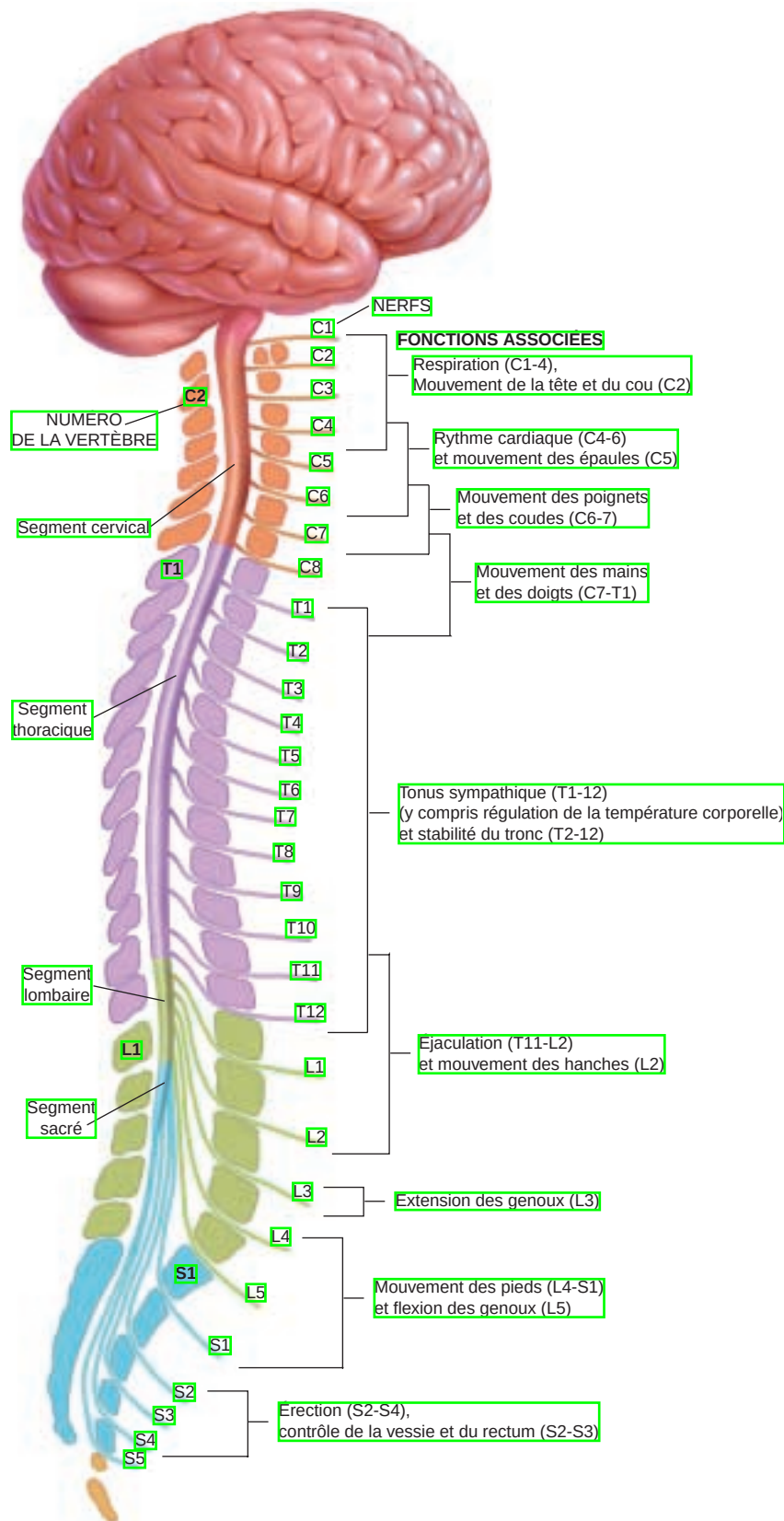
D'autres axones conduisent les influx de bas en haut : ils transmettent des signaux en provenance des

membres et des organes vers des segments bien définis de la moelle épinière, puis vers le cerveau. Ces signaux sont émis par des cellules «transductrices» spécialisées, telles que les capteurs de la peau qui détectent les

changements de l'environnement (la température, l'humidité, par exemple) ou par les cellules qui surveillent l'état des organes.

La moelle épinière contient aussi des circuits de neurones responsables d'activités réflexes ou automatiques et de certains aspects de la marche ; ils sont activables par des signaux qui ne sont pas émis par le cerveau (même s'ils peuvent être modulés par des signaux d'origine cérébrale).

Les corps des neurones de la moelle sont localisés tout le long de la moelle épinière, dans la partie centrale – la substance grise –, en forme de papillon. Les axones, ascendants et descendants, sont situés dans la partie périphérique, la substance blanche, nommée ainsi parce que les axones sont gainés de myéline, une substance blanche et isolante. Les deux zones contiennent également des cellules gliales, qui participent au bon fonctionnement des neurones. Parmi ces cellules, on trouve des astrocytes, en forme d'étoile, des cellules microgliales (de petites cellules qui constituent le système immunitaire du cerveau) et des oligodendrocytes, les cellules qui produisent la myéline. Chaque oligodendrocyte fabrique la myéline de 40 axones simultanément.



Les lésions de la moelle épinière

La nature des lésions médullaires varie selon les personnes, mais on peut répertorier des points communs. Lors d'un accident, les vertèbres qui, normalement, entourent et protègent la moelle épinière peuvent l'écraser, ce qui détruit ou endommage les axones. Parfois, seule la substance grise de la région lésée est endommagée. Si la lésion restait localisée, les déficits musculaires et sensoriels resteraient alors confinés aux tissus qui reçoivent des signaux des neurones du segment médullaire lésé ou qui en émettent, mais les sensations ou les mouvements des

2. QUATRE SEGMENTS de la moelle épinière et les nerfs associés innervent des territoires spécifiques de l'organisme. Les nerfs cervicaux sont reliés au cou, aux bras et à l'appareil respiratoire ; les nerfs thoraciques commandent la posture et de nombreux organes ; les nerfs lombaires contrôlent les jambes ; les nerfs sacrés agissent sur la vessie et sur les intestins ; ils interviennent aussi dans la fonction sexuelle.

membres et des organes situés au-dessous de ce segment ne seraient pas trop perturbés.

Par exemple, quand seule la substance grise est atteinte lors d'une fracture de la huitième vertèbre cervicale (C8), seul le segment médullaire d'où partent les nerfs nommés C8 est touché : les mains sont paralysées, mais les muscles des membres inférieurs et les sphincters fonctionnent normalement. Toute liaison entre les nerfs C8 et les tissus qui y étaient connectés est interrompue, mais les signaux ascendants et descendants véhiculés par les axones localisés dans la substance blanche périphérique continuent à être transmis.

En revanche, quand la substance blanche de ce segment médullaire est également détruite, la lésion interrompt les signaux, empêchant les messages issus du cerveau d'atteindre les régions situées au-dessous d'elle et bloquant les signaux sensoriels qui proviennent de ces régions. Une paralysie des mains et des membres inférieurs s'accompagne d'une perte de contrôle des sphincters.

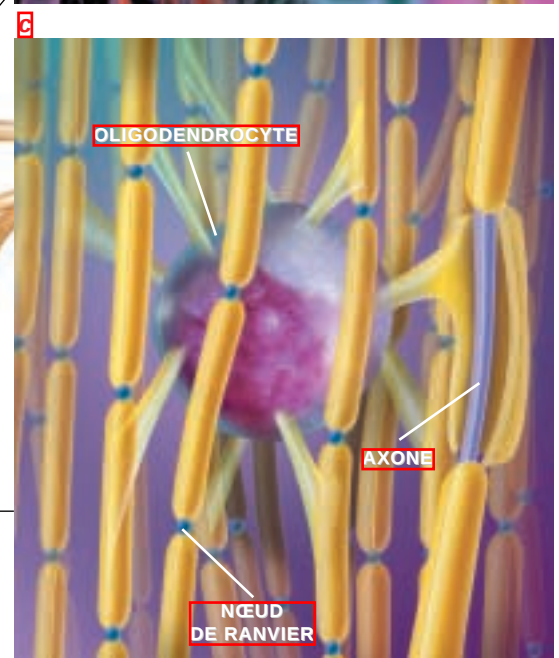
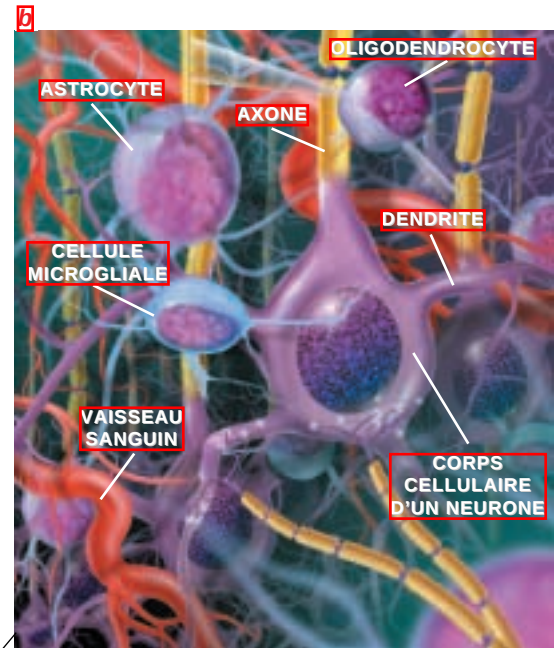
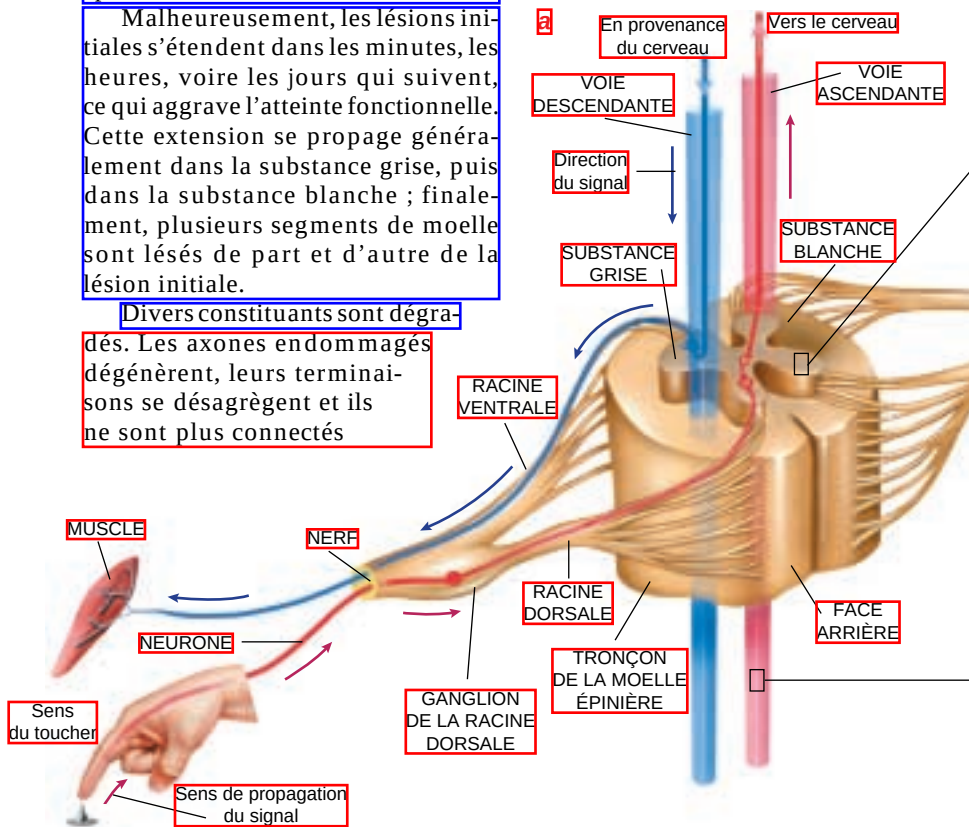
Malheureusement, les lésions initiales s'étendent dans les minutes, les heures, voire les jours qui suivent, ce qui aggrave l'atteinte fonctionnelle. Cette extension se propage généralement dans la substance grise, puis dans la substance blanche ; finalement, plusieurs segments de moelle sont lésés de part et d'autre de la lésion initiale.

Divers constituants sont dégradés. Les axones endommagés dégénèrent, leurs terminaisons se désagrègent et ils ne sont plus connectés

à leurs cibles. Souvent, de nombreux axones restent intacts, mais perdent leur gaine de myéline et ne conduisent plus l'influx nerveux. L'espace qu'occupaient les neurones, les axones et les autres cellules détruites se remplit de liquide, formant un kyste. Les cellules gliales prolifèrent et se regroupent en amas nommés cicatrices gliales. Le kyste et les cicatrices forment une barrière que ne peuvent plus franchir les axones sectionnés qui tenteraient de repousser et de se reconnecter aux cellules qu'ils innervaient avant la lésion. Quelques axones restent parfois intacts, myélinisés et capables de transmettre des signaux ascendants et descendants, mais leur nombre est souvent trop faible pour que les messages soient utilisables par le cerveau ou par les muscles.

Si toutes ces anomalies devaient être intégralement réparées pour que les patients puissent se servir à nouveau de leurs muscles, les espoirs de traitement seraient nuls. Heureusement, il semble que, si l'on parvenait à préserver ne serait-ce que 10 pour

cent des axones fonctionnels, certaines personnes pourraient recommencer à marcher. En outre, si on limitait l'extension de la lésion, l'empêchant de gagner les segments voisins (à un centimètre de distance seulement), on préserverait certaines fonctions essentielles à la qualité de la vie. Ainsi, les personnes ayant une lésion de la moelle au niveau de la vertèbre C7 peuvent bouger les épaules et faire fonctionner les articulations des



3. LA MOELLE ÉPINIÈRE (a) est constituée, en son centre, de substance grise (qui ressemble à un papillon) et d'un anneau de substance blanche. La substance grise (b) contient surtout les corps cellulaires des neurones, mais aussi des astrocytes, des cellules microgliales et des vaisseaux sanguins. La substance blanche (c) renferme aussi des astrocytes et des vaisseaux sanguins, mais surtout des axones, c'est-à-dire les prolongements des neurones

qui transmettent les signaux suivant des voies ascendantes et descendantes le long de la moelle ; elle contient aussi des oligodendrocytes, les cellules qui fabriquent la myéline (la substance blanche isolante qui forme une gaine autour des axones). Les faisceaux d'axones ascendants (a, en rouge) véhiculent les messages sensoriels perçus par l'organisme ; les faisceaux descendants (a, en bleu) transmettent les commandes motrices aux muscles.

coudes et des poignets ; grâce à une rééducation et, parfois, à une réimplantation de tendon, elles peuvent se servir de leurs bras et de leurs mains. Au contraire, si la lésion gagne la vertèbre C6, juste au-dessus, les bras sont paralysés, même si les personnes atteintes peuvent encore bouger les épaules et fléchir les coudes.

Limitier la lésion à tout prix

En raison de la gravité des lésions secondaires, les médecins ont cherché à comprendre comment se propagent les lésions et comment les bloquer. Ils ont découvert que la dégradation qui suit la lésion initiale résulte de plusieurs mécanismes.

Dans les minutes qui suivent le traumatisme, les petits vaisseaux sanguins lésés saignent, et un œdème se forme dans la moelle épinière ; les cellules environnantes ne sont plus

alimentées correctement ni en nutriments ni en oxygène, et elles meurent.

Simultanément, les neurones, les axones et les vaisseaux sanguins endommagés libèrent des substances toxiques qui s'attaquent aux cellules voisines saines. L'une d'elles, notamment, est « excitotoxique » : c'est le glutamate. Dans la moelle épinière saine, les terminaisons de nombreux axones libèrent de petites quantités de glutamate qui, en se fixant sur ses récepteurs neuronaux, assure la transmission des influx nerveux. Quand les neurones, les axones ou les astrocytes médullaires sont lésés, ils libèrent de grandes quantités de glutamate : les neurones voisins sont hyperexcités et laissent pénétrer en leur sein des bouffées d'ions qui déclenchent des réactions de destruction et la production de radicaux libres. Ces molécules très réactives détruisent les membranes

et d'autres constituants des neurones, finissant par les tuer.

Il y a un an encore, on pensait que ces phénomènes excitotoxiques (que l'on observe également après un accident vasculaire cérébral) détruisaient seulement les neurones, mais ils semblent tuer aussi les oligodendrocytes, les cellules qui synthétisent la myéline. Cela expliquerait pourquoi même des axones qui n'ont pas été lésés directement lors d'un traumatisme de la moelle épinière se démyélinisent et perdent leur capacité de transmettre l'influx nerveux.

Une inflammation qui dure plusieurs jours, avec un afflux de cellules immunitaires, renforce ces effets dévastateurs. Normalement, les cellules immunitaires ne pénètrent pas dans le système nerveux central, mais, lorsque les vaisseaux sanguins sont endommagés, elles envahissent le cerveau ou la moelle épinière. Sous l'effet d'une

Les cibles thérapeutiques

Une lésion, d'abord limitée, de la moelle épinière s'étend. De nombreux axones finissent par être soit sectionnés, soit partiellement dénudés de leur gaine de myéline, devenant alors incapables de propager les signaux à travers les régions lésées.

Normalement, les axones ne repoussent pas, et la gaine de myéline ne se reforme pas. Même si l'on parvenait à déclencher une telle régénération, les axones en croissance ne parviendraient pas à franchir la cavité pleine de liquide, ou kyste, qui se forme à l'endroit où les neurones sont détruits et où les axones sont sectionnés. Ce kyste est souvent entouré de « cicatrices gliales », des amas de cellules gliales activées, que les axones pourraient

traverser, mais qui libèrent des substances inhibant la régénération axonale. Chez de nombreuses personnes ayant subi un traumatisme de la moelle épinière, seuls quelques axones restent fonctionnels, à la périphérie de la moelle épinière.

Les traitements qui seront efficaces associeront certainement plusieurs molécules. La plupart des traitements seraient administrés directement sur le site des lésions. On parviendra plus facilement à limiter les destructions qu'à les réparer. Une fois la lésion établie, il sera plus facile de lutter contre la démyélinisation que de déclencher la régénération des axones et la reconstruction de synapses fonctionnelles.

COMPENSER LA DEMYELINISATION

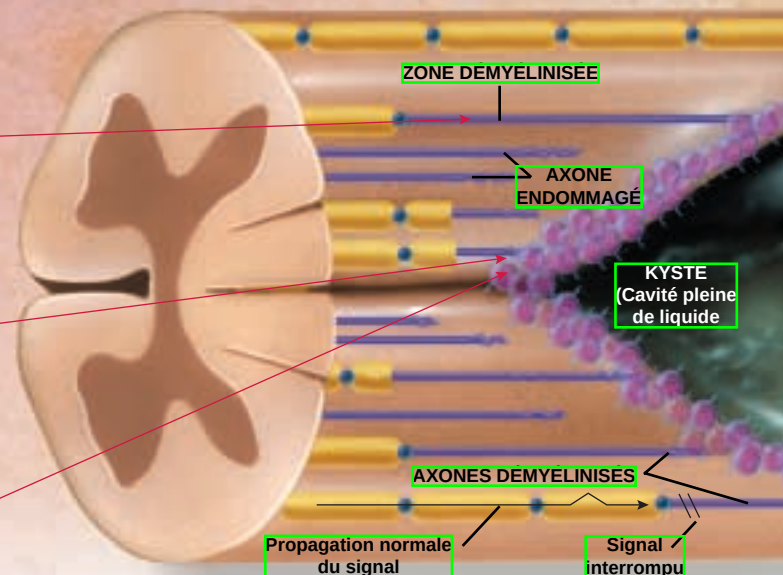
- Administrer des substances empêchant les influx nerveux de se dissiper dans les zones démyélinisées
- Fournir des substances qui activent la remyélinisation des axones par les oligodendrocytes survivants
- Remplacer les oligodendrocytes détruits

STIMULER LA RÉGÉNÉRATION DES AXONES

- Administrer des substances qui bloquent les inhibiteurs naturels de la régénération
- Administrer des composés qui stimulent la régénération axonale

DIRIGER LES AXONES VERS LES CIBLES APPROPRIÉES

- Apporter les molécules de guidage au bon endroit
- Administrer des composés qui stimulent les cellules survivantes pour qu'elles produisent ou présentent des molécules de guidage



lésion, ces cellules immunitaires et les cellules microgliales libèrent aussi des radicaux libres et diverses substances toxiques.

La méthylprednisolone semble limiter les lésions de la moelle épinière en réduisant l'œdème, l'inflammation, la libération de glutamate et l'accumulation de radicaux libres.

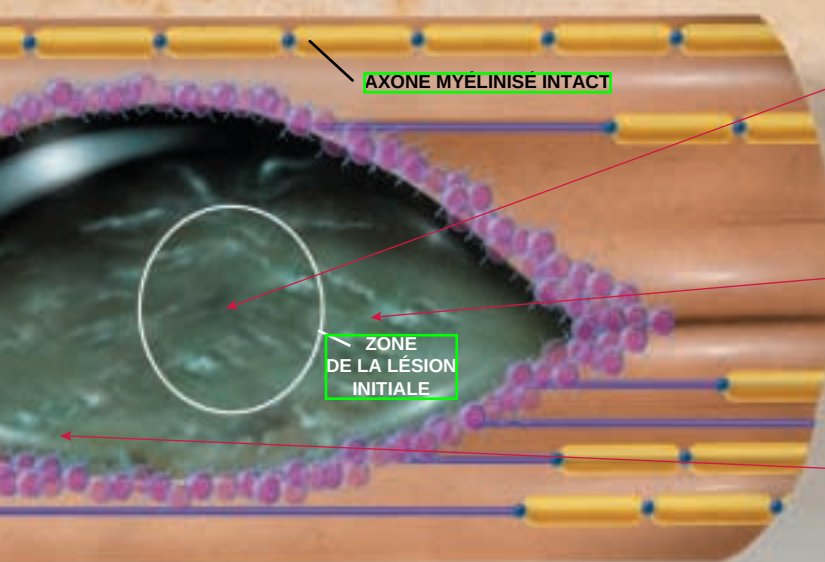
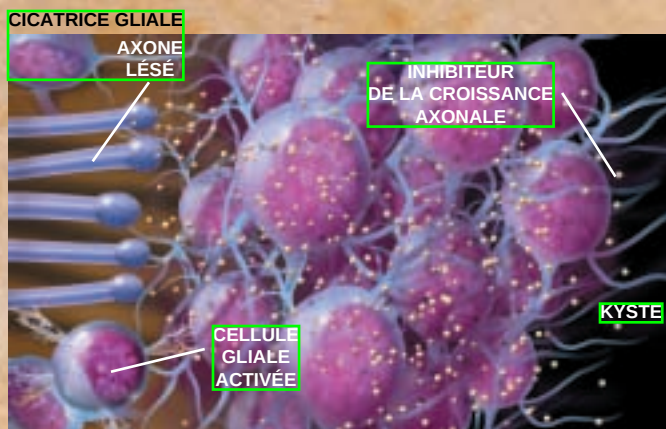
Des études réalisées sur des animaux à la moelle épinière lésée montrent que des substances qui diminuent la sensibilité des cellules au glutamate réduisent les destructions. Les agents qui bloquent sélectivement les récepteurs AMPA du glutamate, nombreux sur les oligodendrocytes et sur les neurones, semblent limiter efficacement l'extension de la lésion initiale : certains antagonistes des récepteurs AMPA ont déjà fait l'objet d'essais préliminaires chez des personnes ayant eu un accident vasculaire cérébral, et de tels essais pourraient commencer dans

quelques années avec des composés apparentés, administrés à des personnes ayant subi une lésion de la moelle épinière.

On croyait que les cellules de la moelle qui étaient détruites par un traumatisme l'étaient toutes par nécrose, un mécanisme où les cellules sont des victimes «passives». Cependant, on a récemment observé que d'autres cellules de la moelle meurent «volontairement», par un mécanisme nommé apoptose. Quelques jours, voire quelques semaines, après le traumatisme initial, une vague de suicides balaie les oligodendrocytes de part et d'autre de la lésion initiale. Cette découverte a, elle aussi, ouvert de nouvelles voies thérapeutiques : des rats ayant reçu des substances qui inhibent l'apoptose ont conservé une meilleure capacité ambulatoire, après un traumatisme de la moelle épinière, que des rats non traités.

De surcroît, au cours des dernières années, les biologistes ont identifié diverses substances, les facteurs neurotrophiques, qui favorisent la survie des neurones et des cellules gliales. Une substance apparentée, le ganglioside GM-1, est en cours d'évaluation clinique : elle semble limiter les lésions médullaires chez l'homme. Pour limiter au mieux les lésions secondaires dans une moelle épinière lésée, on devra vraisemblablement administrer plusieurs médicaments, à des moments précis, pour bloquer les mécanismes délétères, spécifiques des différents types cellulaires.

Pour être efficace, un traitement devrait non seulement réduire l'extension des lésions, mais aussi favoriser leur réparation. Il devrait stimuler la régénération des axones endommagés, c'est-à-dire leur «repousse» et leur reconnexion aux neurones cibles appropriés.



EMPÊCHER L'EXTENSION DE LA LÉSION INITIALE

- Administrer des agents qui préservent les cellules survivantes contre l'excitotoxicité
- Administrer des composés qui empêchent le suicide cellulaire ou renforcent les défenses des cellules stressées

ETABLIR DES PONTS

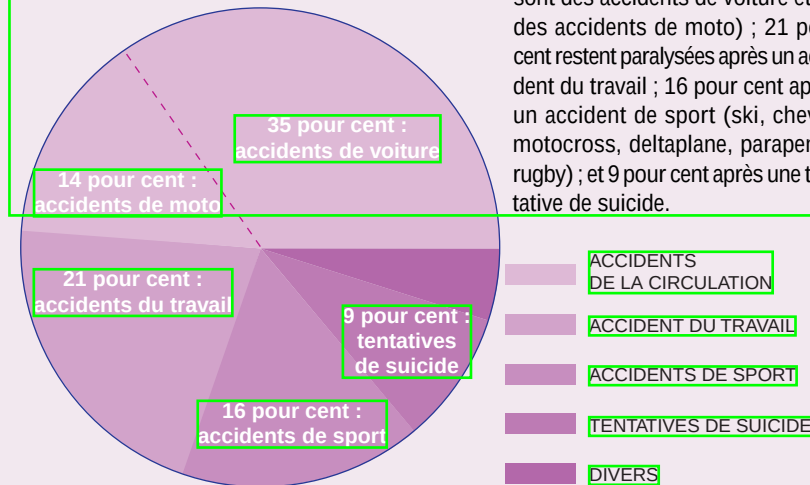
- Implanter (dans le kyste) un tissu qui sert de soutien aux axones et facilite leur croissance

REMPLENER LES CELLULES MORTES

- Implanter des cellules capables de produire tous les types de cellules détruites
- Administrer des substances qui stimulent les cellules indifférenciées, présentes dans la moelle épinière, de façon à ce qu'elles remplacent les cellules détruites

Les statistiques en France

En France, d'après l'Institut pour la recherche sur la moelle épinière, on dénombre 40 000 paraplégiques (les jambes sont paralysées) et tétraplégiques (les jambes et les bras sont paralysés). Chaque année, près de 1 000 personnes sont touchées, et 60 pour cent d'entre elles ont moins de 30 ans. Parmi les personnes subissant une lésion de la moelle épinière, 49 pour cent sont atteintes lors d'un accident de la circulation (71 pour cent sont des accidents de voiture et 29 des accidents de moto) ; 21 pour cent restent paralysées après un accident du travail ; 16 pour cent après un accident de sport (ski, cheval, motocross, deltaplane, parapente, rugby) ; et 9 pour cent après une tentative de suicide.



Bien que les axones des neurones du système nerveux central des mammifères adultes ne «repoussent» généralement pas, ils semblent en avoir la capacité quand l'environnement est favorable : les autres neurones de l'organisme et ceux de la moelle épinière et du cerveau immatures ont des axones qui régénèrent ; de surcroît, des expériences sur l'animal ont montré qu'un environnement adéquat déclenche un allongement relativement rapide des axones de la moelle épinière.

Comment déclencher la régénération

Les molécules inhibant la régénération axonale, dont certaines sont présentes dans la myéline même, abondent dans la moelle épinière. Un anticorps nommé IN-1 empêche les inhibiteurs d'agir : injectée dans la moelle épinière lésée de rats, cette molécule favorise la repousse de certains axones sectionnés ; lorsque les voies nerveuses commandant l'activité des pattes antérieures sont endommagées, les animaux traités retrouvent une certaine mobilité des pattes (les animaux non traités restent paralysés). On ne peut tester sur l'homme l'anticorps utilisé chez les rongeurs, car il serait détruit par le système immunitaire, mais plusieurs équipes cherchent une version humanisée de cet anticorps.

On a identifié beaucoup de molécules qui inhibent la croissance neuronale ; certaines sont produites par les astrocytes, d'autres par la matrice extracellulaire. Étant donné cette variété, une seule molécule ne bloquera pas tous les inhibiteurs, et l'on devra certainement en combiner plusieurs.

S'il est utile de museler les substances qui freinent la régénération axonale, on peut aussi chercher à stimuler l'allongement des axones. La recherche des facteurs ayant cette action a progressé grâce à l'étude du développement du système nerveux. Il y a plusieurs dizaines d'années, les biologistes ont isolé le facteur de croissance du nerf (NGF) qui assure la survie et le développement du système nerveux périphérique. Puis on a découvert que ce facteur n'est qu'un membre d'une famille de protéines qui prolongent la survie des neurones et favorisent la croissance des axones. D'autres familles de facteurs neurotrophiques ayant des propriétés similaires ont ensuite été identifiées. Ainsi, la neurotrophine-3 stimule sélectivement la croissance des axones qui descendent le long de la moelle épinière, à partir du cerveau.

Les neurones adultes restent capables de réagir aux signaux de régénération des axones déclenchés par ces facteurs. Toutefois, la production naturelle de ces substances ne suffit manifestement pas pour assurer la

réparation de la moelle épinière. Pis encore, la synthèse de certains composants diminue durant les semaines qui suivent un traumatisme médullaire. Diverses études sur l'animal ont montré que l'on améliore la régénération des axones quand on augmente artificiellement la concentration de ces composants après une lésion. Certains facteurs neurotrophiques favorisant la régénération, tel le facteur de croissance des fibroblastes, ont été testés chez des patients victimes d'un accident vasculaire cérébral. Aucun n'a encore été administré à des personnes ayant subi une lésion de la moelle épinière, mais beaucoup sont à l'étude chez l'animal.

Avant les tests cliniques, on devra s'assurer que ces molécules n'augmentent pas les douleurs, fréquentes après une lésion médullaire. Ces douleurs ont plusieurs origines ; la repousse des axones en des endroits inadéquats et des connexions inappropriées en sont des causes. Le cerveau interprète parfois les influx circulant dans ces axones comme des signaux de douleur. Les facteurs neurotrophiques risquent d'exacerber ces sensations et de sensibiliser les circuits médullaires de la douleur et les cellules de la peau qui détectent la douleur.

Si l'on parvient à faire repousser les axones, encore faudra-t-il qu'ils se connectent aux cellules auxquelles ils étaient reliés avant le traumatisme. Là encore, les études du développement embryonnaire ont apporté des informations précieuses.

Au cours de leur développement, les axones sont guidés vers leurs cibles par des molécules qui agissent à leur extrémité. Au cours des cinq dernières années, on a découvert un nombre surprenant de substances qui participent à ce guidage. Certaines, notamment les nétrines, sont libérées par les neurones et par les cellules gliales. Elles favorisent la croissance des axones dans certaines directions et bloquent l'avancée dans d'autres. D'autres molécules de guidage sont des constituants de la matrice extracellulaire ; des molécules adhésives présentes à l'extrémité des axones se lient à certaines d'entre elles, qui servent ainsi de points d'ancrage pour les axones. Au cours du développement, les molécules qui indiquent aux axones la direction à suivre sont présentées selon un ordre bien défini.

Établir les bonnes connexions

Aujourd'hui, on ignore comment fournir, à l'endroit approprié, tous les signaux chimiques requis pour le guidage. Toutefois, on pourrait probablement favoriser la régénération en n'administrant que quelques molécules, par exemple une sélection de nétrines et de constituants de la matrice extracellulaire. Les substances déjà présentes dans la moelle épinière finiraient d'assurer un guidage correct.

On envisage aussi de combler la brèche créée par la lésion médullaire. On dirigerait les axones endommagés vers leur destination au moyen d'un conduit où ils progresseraient ou d'un support qui les aiderait à traverser le kyste normalement infranchissable. Cette trame de soutien procurerait aussi les substances favorisant la croissance.

Ainsi, des biologistes ont implanté des tubes enrobés de cellules de Schwann dans une brèche pratiquée dans la moelle épinière de rongeurs. Ils ont choisi des cellules de Schwann (les cellules gliales du système nerveux périphérique), car elles favorisent la régénération des axones. Les greffes ont déclenché une croissance axonale à l'intérieur des tubes, mais elle est restée minime.

Récemment, on a utilisé des cellules gliales du système olfactif, que l'on ne trouve que dans les voies reliant le nez aux bulbes olfactifs. Quand on plante ces cellules dans la moelle épinière d'un rat dont les voies descendantes ont été sectionnées, les implants stimulent une régénération partielle des axones situés au-dessus de la greffe : on a constaté une amélioration notable des capacités motrices de l'animal. La transplantation de cellules gliales des voies olfactives en même temps que des cellules de Schwann stimule encore davantage la croissance.

Théoriquement, on pourrait obtenir des cellules gliales olfactives en pratiquant une biopsie. Toutefois, quand on aura identifié les propriétés qui permettent à ces cellules (et à d'autres) de guider la croissance des axones, on pourra aussi modifier génétiquement d'autres types de cellules pour leur conférer les propriétés requises.

Des équipes ont déjà modifié des fibroblastes (des cellules abondantes dans le tissu conjonctif et dans la peau)

par génie génétique, afin de les utiliser comme cellules de pontage : on les a modifiés pour leur faire produire la molécule neurotrophique NT-3, puis on les a transplantés dans la moelle épinière sectionnée de rongeurs. Les fibroblastes modifiés ont favorisé la régénération partielle des axones. Dans ces expériences, les fibroblastes génétiquement modifiés ont intensifié la myélinisation des axones régénérés et amélioré l'activité motrice des pattes postérieures.

Compenser la perte de cellules

On envisage aussi de transplanter des cellules du système nerveux central. Elles remplaceraient les cellules mortes, établiraient des liens entre les cellules situées de part et d'autre de la lésion et libéreraient des protéines

favorisant la régénération des axones. La transplantation de tissu provenant du système nerveux central d'un fœtus a donné des résultats encourageants chez des animaux adultes traités immédiatement après un traumatisme : ces neurones de fœtus de rat sont implantés au-dessous de la lésion. Ils se développent, et leurs axones s'étendent sur plusieurs segments de la moelle épinière (dans le sens ascendant ou descendant) ; ils stimulent aussi les neurones déjà présents et leur font projeter des axones en cours de régénération vers les tissus transplantés. Contrairement aux animaux non traités, les animaux greffés retrouvent une activité locomotrice coordonnée, mais involontaire. Ces expériences ont eu l'intérêt supplémentaire de montrer que les axones trouvent parfois leurs cibles même en l'absence de molécules de guidage exogènes.



4. UN KYSTE est visible sur ces images de moelles épinières endommagées. A la suite d'un traumatisme cervical (à gauche), une zone sombre, correspondant à une cavité, est apparue au centre de la moelle épinière (cartouche). Le kyste visible chez un rat lésé (à droite) est indiqué par des pointillés ; on observe également les axones endommagés interrompus juste au-dessus du kyste (filaments noirs).

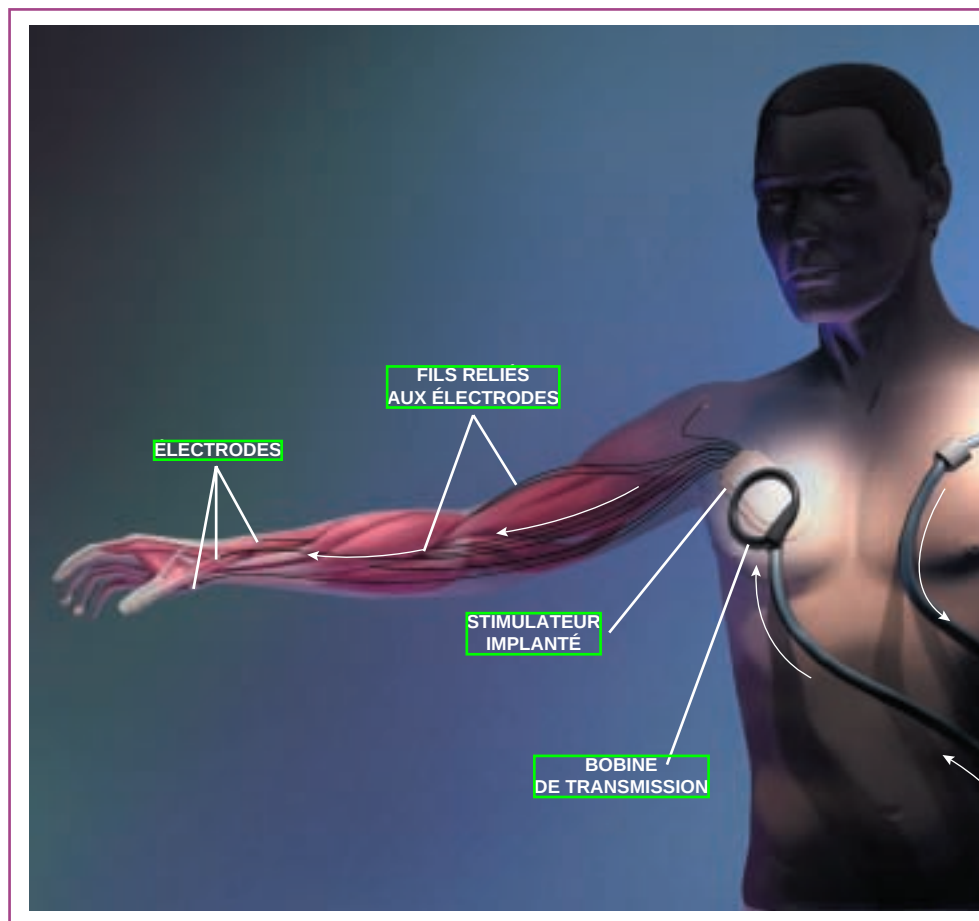
Certaines personnes ayant une atteinte médullaire ancienne ont reçu des greffes de tissu fœtal, mais il est trop tôt pour analyser les résultats. De surcroît, l'utilisation de tissu fœtal humain sera sûrement limitée par des dilemmes éthiques et par manque de tissus. On pourrait remplacer le tissu fœtal par des cellules souches, des cellules immatures capables de se diviser et d'engendrer aussi bien des répliques d'elles-mêmes que la quasi-totalité des types de cellules de l'organisme.

Divers types de cellules souches ont été identifiés, notamment celles qui produisent tous les types de cellules du système sanguin, de la peau, de la moelle épinière et du cerveau. Les cellules souches du système nerveux central de l'adulte, bien qu'elles semblent quiescentes, peuvent produire des neurones et des cellules gliales. Enfin, en 1998, plusieurs équipes ont isolé des cellules souches humaines plus polyvalentes : comme les cellules souches obtenues précédemment chez d'autres vertébrés, les cellules souches embryonnaires humaines peuvent être cultivées et, en théorie, produire la quasi-totalité des types cellulaires de l'organisme, notamment des cellules de la moelle épinière.

L'intérêt des cellules souches

Comment des cellules souches pourraient-elles favoriser la réparation de la moelle épinière? Quand les biologistes sauront prélever ces cellules chez un malade et en commander la différenciation cellulaire, on pourra prélever des cellules souches neurales du cerveau ou de la moelle épinière, les laisser se multiplier, en culture, sous forme de cellules indifférenciées, puis les réimplanter dans la moelle épinière du donneur sans craindre que le système immunitaire ne les rejette. On pourrait aussi prendre des cellules souches embryonnaires congelées, déclencher leur différenciation en précurseurs (ou progéniteurs) des cellules de la moelle épinière, et les greffer au malade. On devrait bientôt étudier l'intérêt des cellules souches prélevées dans le cerveau et greffées sur des personnes ayant subi une lésion de la moelle épinière.

On espère que des cellules souches greffées dans la moelle épinière se multiplieraient et se différencieraient en



neurones et en cellules gliales ; elles remplaceraient une partie des cellules détruites et rétabliraient des connexions synaptiques entre les neurones. Chez l'animal, des cellules souches greffées dans le système nerveux normal ou endommagé engendrent des cellules gliales et des neurones fonctionnels, dans la région de la transplantation. Ces résultats et ceux qui ont été obtenus avec les tissus fœtaux indiquent que des signaux indispensables à la différenciation et à l'établissement des connexions neuronales existent dans le système nerveux lésé. Pour améliorer l'efficacité de la méthode, on pourrait utiliser des cellules génétiquement modifiées : pour que des cellules puissent être modifiées, elles doivent être capables de se diviser, ce qui, contrairement aux neurones, est le cas des cellules souches.

La régénération de la moelle épinière par les cellules souches est encore de la science-fiction. Toutefois, cette méthode, si elle voit le jour, pourrait être supplantée par la thérapie génique. On introduirait, dans des cellules de la moelle épinière encore intactes, des gènes qui stimuleraient la synthèse de

protéines favorisant la prolifération des cellules souches, leur différenciation et leur survie, ainsi que la régénération des axones, leur guidage vers les cibles appropriées et leur remyélinisation. Avant que ces traitements ne soient disponibles, d'autres méthodes seront sans doute utilisables : on pourrait améliorer l'état des malades grâce à des médicaments qui restaurent la transmission des signaux dans les axones rendus inopérants par la démyélinisation. On teste aujourd'hui l'efficacité d'une substance qui devrait compenser la démyélinisation, la 4-aminopyridine. Elle bloque, de façon temporaire, les canaux potassium présents dans la membrane des axones, permettant ainsi aux signaux électriques de traverser les zones démyélinisées. La fonction sensorielle et la fonction motrice de certaines personnes ayant reçu ce médicament ont été légèrement améliorées (ce traitement semblerait indiqué dans les cas de sclérose en plaques, maladie où la myéline entourant les axones des neurones du système nerveux central est détruite ; toutefois, les personnes atteintes de cette maladie ont souvent des crises d'épilepsie



CAPTEUR
DE LA POSITION
DE L'ÉPAULE

BOÎTIER
DE CONTRÔLE
EXTERNE

Les progrès de l'électronique

Des électrodes pourraient-elles stimuler des nerfs rendus inopérants par une lésion de la moelle épinière et restaurer ainsi la fonction de certains muscles paralysés ? En fait, de tels dispositifs existent déjà, et deux nouveaux systèmes améliorant l'autonomie des personnes équipées ont récemment reçu l'agrément de l'administration américaine de la santé. L'un d'eux permet à certaines personnes qui ont conservé la mobilité de l'épaule d'utiliser leur main. Des mouvements précis de l'autre épaule activent un détecteur qui envoie des signaux vers une unité de commande externe. Cette dernière relaie les signaux jusqu'à une boucle de transmission implantée, reliée à des fils électriques dont l'extrémité atteint les muscles du bras et de la main.

L'autre dispositif, utilisé depuis longtemps en Europe, permet aux personnes atteintes de commander le sphincter de leur vessie. Un dispositif de transmission des signaux active une sorte de pacemaker qui envoie des signaux électriques aux nerfs innervant la vessie : la vessie et le sphincter se contractent, puis se relâchent, de sorte que la vessie peut se vider. Le système stimule également les nerfs de l'intestin et favorise l'évacuation des selles.

D'autres dispositifs électriques sont disponibles ou en cours d'étude : ils permettent notamment la station debout (pour faciliter, par exemple, le déplacement d'un fauteuil roulant au lit ou aux toilettes), l'exercice du cœur et des poumons, ils facilitent la respiration, déclenchent la toux, améliorent la circulation sanguine. Depuis une dizaine d'années, des pompes implantées sous la peau de l'abdomen et communiquant avec le liquide céphalo-rachidien délivrent à la moelle des produits qui réduisent les spasmes musculaires parfois extrêmement gênants.

d'axones intacts par ailleurs. La remyélinisation restaurerait diverses fonctions essentielles, tel le contrôle des sphincters.

Bien sûr, la réimplantation chirurgicale de tendons et les dispositifs électriques élaborés restaurent déjà certaines fonctions essentielles, mais beaucoup de personnes ne retrouveront leur autonomie qu'après reconstruction des tissus lésés grâce à la régénération des axones détruits et au rétablissement des connexions nerveuses interrompues.

Jusqu'à présent, le degré de régénération axonale et de formation de nouvelles synapses obtenu lors des interventions réalisées sur des animaux ayant des lésions médullaires n'a jamais atteint celui qui serait nécessaire à la restauration des mouvements de préhension, de la station debout ou de la marche chez des hommes adultes ayant une lésion médullaire ancienne. En raison de la complexité de la réparation de la moelle épinière, on ne peut prévoir, malgré tous les progrès accomplis, à quel moment les stratégies de régénération de la moelle épinière seront disponibles.

Aujourd'hui, les soins prodigués aux personnes ayant subi une atteinte de la moelle épinière ont surtout pour objectif d'utiliser au mieux la fonction médullaire résiduelle, mais les tentatives de réparation des lésions de la moelle et de restauration des fonctions perdues ne relèvent plus de la science-fiction.

et la 4-aminopyridine risque de renforcer cette prédisposition).

Un traitement par un facteur neurotrophique, le NT-3 par exemple, capable de stimuler la remyélinisation des axones chez les animaux, est déjà en cours d'essais cliniques de phase III chez des personnes ayant une lésion de la moelle épinière. Il est injecté en quantité suffisante pour agir sur les nerfs des intestins, ce qui en améliore la fonction, mais les concentrations sont insuffisantes pour être efficaces dans le système nerveux central. Ainsi, cet essai n'est pas destiné à tester l'intérêt potentiel du NT-3 au cours de la remyélinisation, mais, si l'innocuité du produit est confirmée, d'autres essais suivront ; on administrera alors des doses suffisamment fortes pour déclencher la myélinisation ou la régénération des axones.

Les espoirs thérapeutiques

Durant les années 1990, nos connaissances sur les lésions de la moelle épinière et la croissance neuronale ont notablement progressé. On devrait bientôt pouvoir améliorer la mobilité

des personnes ayant subi un traumatisme médullaire en leur administrant plusieurs traitements selon un ordre bien défini. Certains limiteront les lésions secondaires, d'autres favoriseront la régénération des axones et la remyélinisation, d'autres encore remplaceront les cellules détruites.

Quand ces espoirs se concrétiseront-ils ? La prévision est difficile, car les médicaments efficaces chez l'animal ne le sont pas toujours chez l'homme, et certains qui semblent prometteurs dans des essais cliniques menés sur quelques malades ne tiennent pas toujours leurs promesses quand on traite beaucoup de malades. Néanmoins, quelques essais cliniques sont en cours chez l'homme, et d'autres devraient bientôt commencer. On saura sans doute limiter l'étendue d'une lésion avant de savoir la réparer, et les premiers traitements destinés à minimiser les lésions consécutives à un traumatisme aigu devraient être assez rapidement disponibles. Parmi les stratégies de réparation, la stimulation de la remyélinisation devrait être la plus accessible, car elle ne requiert qu'une restauration de la gaine

John MCDONALD est professeur de neurologie à la faculté de médecine de Washington. Il a écrit cet article en collaboration avec plusieurs chercheurs de la Fondation Christopher Reeve de lutte contre la paralysie.

J.W. FAWCETT, *Spinal Cord Repair : From Experimental Models to Human Application*, in *Spinal Cord*, vol. 36, n° 12, pp. 811-817, décembre 1988.

M.E. SCHWAB et D. BARTHOLDI, *Degeneration and Regeneration of Axons in the Lesioned Spinal Cord*, in *Physiological Reviews*, vol. 76, n° 2, pp. 319-370, avril 1996.

M. TESSIER-LAVIGNE et C.S. GOODMAN, *The Molecular Biology of Axon Guidance*, in *Science*, vol. 274, pp. 1123-1133, novembre 1996.

Gerd KEMPERMANN et Fred H. GAGE, *La multiplication des neurones chez l'adulte*, in *Pour la Science*, juillet 1999.

Le chant des Touvas

THEODORE LEVIN • MICHAEL EDGERTON

En modifiant la morphologie de la gorge et de la bouche, on peut chanter deux mélodies simultanément. Ce chant diphonique est la spécialité des chanteurs du Sud de la Sibérie.

Dans la République autonome de Touva, entre la Russie et la Mongolie, les prairies et les forêts de la taïga impressionnent par leur silence. Entendant l'oreille, on perçoit les bruits naturels : une subtile symphonie de bourdonnements, de bêlements, de murmures, de piaulements, de sifflements... Cernée de montagnes, isolée et essentiellement rurale, la République de Touva est ainsi un de ces lieux où les bruits de l'homme n'étouffent pas ceux de la nature.

L'ambiance sonore de la République de Touva inspire aux bergers semi-nomades une forme de musique qui se fonde dans ces sons naturels : ils «communiquent» avec leur environnement par des chants à deux mélodies, produites simultanément par un seul chanteur. Le premier est un son fondamental

grave, soutenu, semblable au son du bourdon d'une cornemuse. Le second est une série d'harmoniques à une ou plusieurs octaves d'intervalle, qui rappellent le sifflement d'un oiseau, les rythmes syncopés d'un torrent de montagne ou le petit galop d'un cheval.

Localement, ce chant est nommé *khöömei* ou *khoomii*, qui dérive du mot mongol signifiant gorge. En France, on le nomme chant de gorge, ou chant diphonique, et certains chanteurs occidentaux contemporains qui sont parvenus à maîtriser cette technique le nomment également chant harmonique. Ces chants sont à la fois un mode d'expression et un phénomène acoustique intéressants ; nous les avons étudiés du point de vue de l'ethnomusicologie et de la composition musicologique.

L'imitation des sons

Les légendes de Touva racontent que le chant de gorge est très ancien : les premiers chanteurs ont cherché à reproduire les sons naturels dont les timbres ou les colorations tonales sont riches en harmoniques, tel le gargouillement de l'eau ou le sifflement des vents. L'origine du chant de gorge reste donc mystérieuse, mais la musique pastorale touva semble être liée à une ancienne tradition animiste, selon laquelle les objets et les phénomènes naturels ont une âme ou sont habités par des esprits.

L'animisme touva stipule que la spiritualité des montagnes et des rivières se manifeste à la fois par leur forme et par leur situation physique, et aussi par les sons qu'elles émettent



1. L'*IGIL*, dont joue Andreï Chuldum-ool (à droite), est une vièle à deux cordes, fabriquée avec la peau, le crin et les boyaux d'un cheval. Selon les Touvas, elle reproduit les sons équiens et permet au

musicien d'assimiler les pouvoirs spirituels du cheval. L'imitation des sons est le fondement culturel de la musique touva qui s'inspire de l'environnement (*ci-dessus*).



naturellement ou en réponse aux sollicitations humaines. Par exemple, l'écho d'une falaise a un sens spirituel. L'âme des animaux, également, s'exprime par leurs sons. L'homme maîtriserait ces pouvoirs spirituels en reproduisant tous ces bruits.

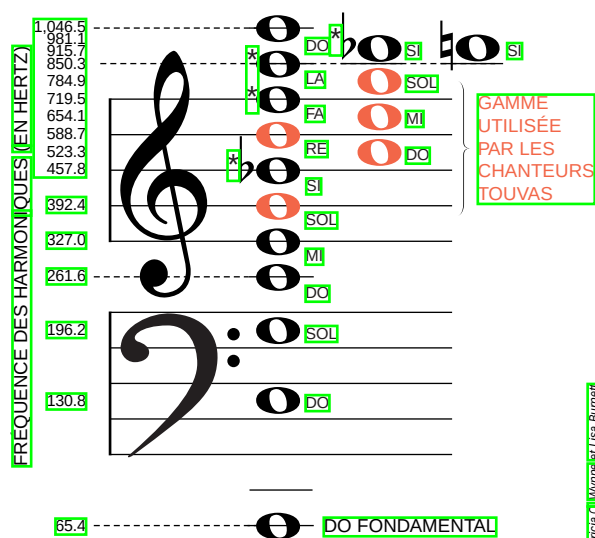
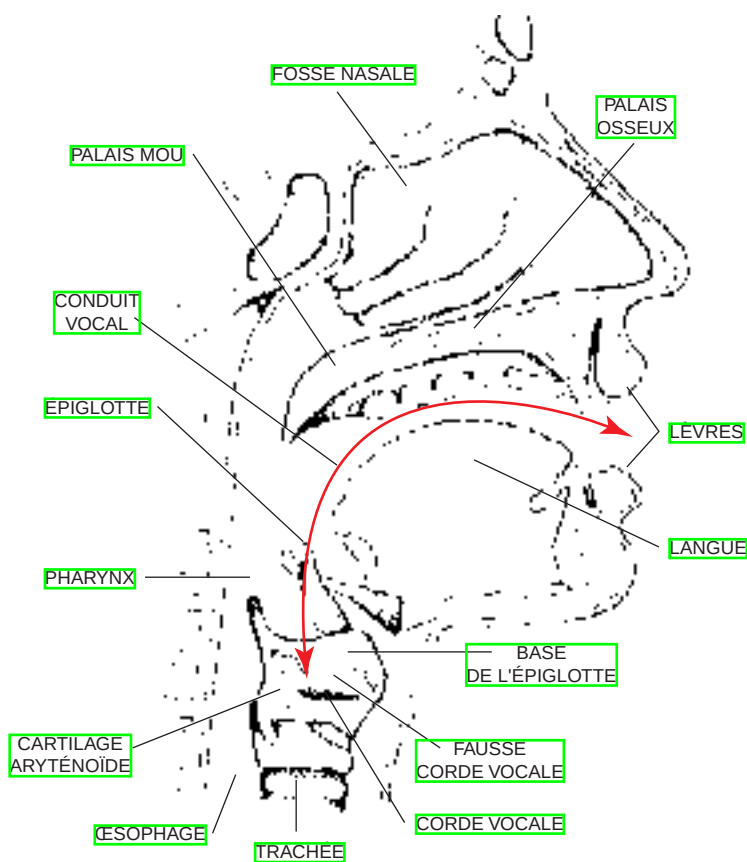
Chez les bergers, imiter les sons ambiants est aussi naturel que parler. Le chant de gorge n'est pas officiellement enseigné, mais appris à la manière d'une langue : de nombreux pâtres pratiquent le chant de gorge, sans être toujours capables de former des airs mélodieux. Aujourd'hui, la croyance que le chant de gorge rend les femmes stériles disparaît, et les femmes jeunes

pratiquent de plus en plus cette technique. La popularité du chant de gorge chez les bergers touvas est née de la coïncidence de l'animisme lié aux subtilités du son et du timbre, et de la bonne propagation des harmoniques à travers les vastes étendues de la steppe.

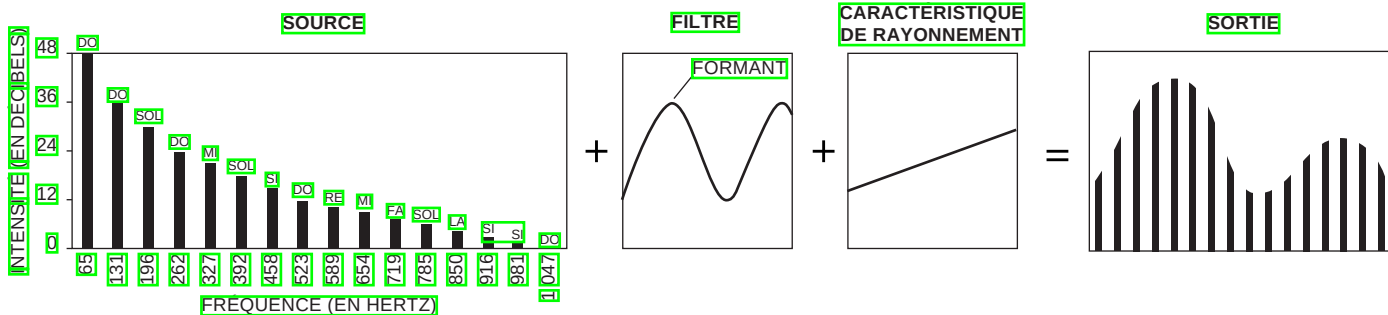
Il y a 20 ans, la plupart des Touvas considéraient la musique trop « paysanne » pour en donner des concerts, mais ceux-ci sont aujourd'hui courants ; des groupes de professionnels sont célèbres, et les meilleurs chanteurs sont devenus les symboles de la culture nationale.

Les plus beaux chants de gorge s'écoutent en République de Touva et

dans les territoires voisins de l'Altai, en particulier ceux de la Mongolie occidentale. Cependant, cette pratique des harmoniques vocalement renforcées existe aussi dans diverses régions d'Asie centrale, telles les montagnes de l'Oural, où les musiciens du peuple turcophone des Bachkirs chantent des mélodies avec des harmoniques renforcées par le souffle selon un style nommé *uzliu*. Par ailleurs, les chanteurs d'épopées de l'Ouzbékistan, du Karakalpakstan et du Kazakhstan (trois régions situées entre la mer Noire et la Chine) ont introduit des harmoniques renforcées dans la poésie orale. En outre, certaines formes de chant du



2. LE SYSTEME VOCAL HUMAIN est un instrument de musique complexe : le bourdonnement des cordes vocales et, dans certains chants de gorge, des fausses cordes vocales est filtré par le conduit vocal (à gauche), qui s'étend jusqu'aux lèvres. Le bourdonnement engendre un son fondamental, par exemple le do grave à une fréquence de 65,4 hertz, et ses harmoniques, dont les fréquences sont des multiples entiers de celles du fondamental (ci-dessus). On a représenté ici les notes correspondantes les plus proches dans la gamme tempérée, où tous les intervalles entre les sons sont égaux. Les astérisques indiquent les harmoniques qui ne s'alignent pas parfaitement sur les notes de la gamme tempérée.



3. LA THÉORIE DE LA SOURCE ET DU FILTRE sépare la production de la voix et sa mise en forme. Les cordes vocales produisent un mélange d'harmoniques dont l'intensité est inversement proportionnelle à la fréquence : les harmoniques les plus graves sont les

plus intenses. Le conduit vocal transmet davantage les harmoniques dont les fréquences coïncident avec celles des formants. Enfin, la « caractéristique de rayonnement » de l'air extérieur constitue un deuxième filtre.

bouddhisme tibétain contiennent une harmonique renforcée, soutenue par un son fondamental. Plus rare dans d'autres régions du monde, l'utilisation des harmoniques vocales n'en est toutefois pas absente : on l'a étudiée dans le chant traditionnel des femmes Xhosa, en Afrique du Sud, et, dans les années 1920, dans certaines improvisations du chanteur texan Arthur Miles.

Depuis dix ans, l'étude des techniques et des propriétés acoustiques des harmoniques renforcées a suivi le succès grandissant des musiques toubou et mongole à travers le monde. On explique le chant en le considérant formé par une source et un filtre : la source (les cordes vocales, qui sont deux membranes horizontales dans le larynx) produit des ondes sonores, que le filtre (le conduit vocal, qui s'étend des cordes vocales aux lèvres) façonne en voyelles, en consonnes et en notes musicales (voir la figure 3).

Passionné d'harmoniques

Le son est la variation de pression périodique qui se propage dans les gaz, dans les liquides ou dans les solides. Quand on parle ou quand on chante, l'onde est créée par les vibrations des cordes vocales, qui perturbent l'air qui sort des poumons ou qui y entre. La périodicité de la vibration des cordes vocales détermine la fréquence (ou hauteur) fondamentale du son produit. Toutefois, cette vibration n'est pas sinusoïdale ; elle est composée de plusieurs ondes sinusoïdales simples, de sorte que le son est un mélange de plusieurs sons purs plus hauts que le son fondamental. Chacun de ces sons est une harmonique ; sa fréquence est un multiple entier de celle du son fondamental. Par exemple, le son d'opéra le plus grave est le *do* grave, dont la fréquence est égale à 65,4 hertz (ou vibrations par seconde) ; ses harmoniques ont des fréquences de 130,8 hertz, de 196,2 hertz, etc. (voir la figure 2). Normalement, l'intensité des harmoniques diminue, avec leur hauteur, de 12 décibels par octave : autrement dit, chaque fois que la fréquence double, l'intensité est divisée par environ 16, puisque l'échelle des décibels est logarithmique.

Le filtre est le conduit vocal que parcourt le son. L'air présent dans le conduit vocal n'est pas un milieu passif qui transmettrait le son sans le

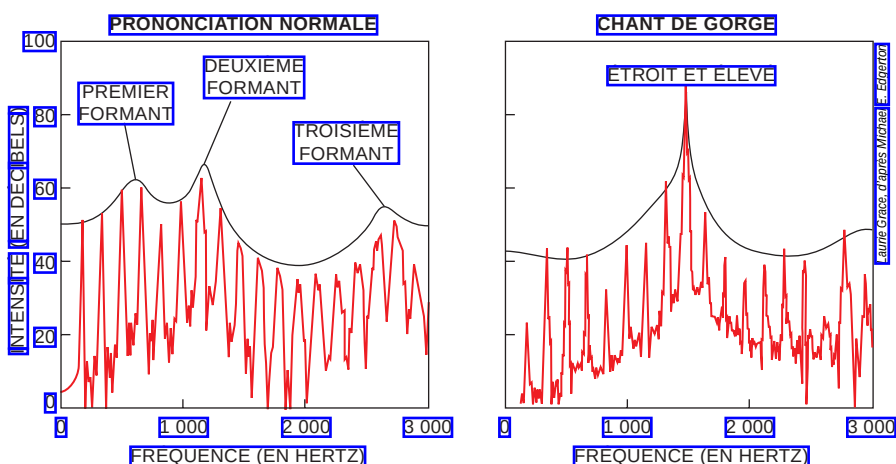
modifier ; il résonne à certaines fréquences, nommées formants, tout comme une bouteille résonne quand on souffle sur le goulot. Selon les fréquences, ces résonances naturelles amplifient ou étouffent le son des cordes vocales, transformant un bourdonnement en sons expressifs.

L'onde est également modifiée lorsqu'elle se propage à l'extérieur de la bouche : dans cet espace plus vaste, elle perd de l'énergie parce que la quantité d'air mise en mouvement est supérieure. Ce filtrage externe, nommé caractéristique de rayonnement, atténue plus les basses fréquences que les hautes fréquences.

L'ensemble de la source, du filtre et de la caractéristique de rayonnement

(voir la figure 3) produit un son dont l'intensité des harmoniques décroît en puissance à raison de six décibels par octave, sauf pour les harmoniques qui ont une fréquence proche de celles des formants (voir *La voix humaine*, par Robert Sataloff, *Pour la Science*, février 1993).

Dans la parole et le chant classiques, la majeure partie de l'intensité est concentrée dans le son fondamental, tandis que les harmoniques déterminent le timbre, c'est-à-dire la qualité sonore, qui distingue, par exemple, le son d'un violon du son d'une flûte. Dans le chant de gorge, une harmonique acquiert une intensité telle qu'elle est perçue comme un son distinct, proche d'un sifflement



4. CES SPECTRES SONORES montrent la différence entre une énonciation normale du son [o] de «fort» (à gauche) et le chant de gorge (à droite). Dans les deux cas, l'intensité est concentrée sur les fréquences des harmoniques produites par les cordes vocales (en rouge). Lorsque les harmoniques ont une fréquence égale à celle d'un formant du conduit vocal (en noir), elles sont amplifiées.

Le chant diphonique : un mode d'emploi de Trâm Quang Hai

Après quelques années d'essais infructueux, je suis soudainement arrivé à maîtriser la technique du chant diphonique dans un embouteillage sur le boulevard périphérique parisien. Grâce à d'autres expériences, dans mon laboratoire cette fois-ci, j'ai ensuite mis au point deux méthodes de chant diphonique accessibles à tous.

Dans la première méthode, la langue est en position de repos, (la base de la langue peut être légèrement remontée, mais elle ne touche jamais le voile du palais). Répétez les deux voyelles *u* et *i* alternativement (comme pour dire *oui*) et bougez seulement la bouche et les lèvres : vous percevez alors faiblement des harmoniques.

La seconde méthode implique la division de la bouche en deux cavités. Chantez avec une voix de gorge la lettre *l*. Puis maintenez la pointe de la langue au centre du palais. Prononcez alors la voyelle *u*, la pointe de la langue est toujours collée fermement à la limite du palais dur et du palais mou. Ensuite, tout en chantant, contractez les muscles du cou et de l'abdomen, comme lorsque vous soulevez un objet très lourd. Donnez un timbre nasal à votre chant et, enfin, prononcez alternativement les voyelles *i* et *u* (ou *o* et *a*) liées : vous obtenez ainsi le bourdon et les harmoniques. Modifiez la position des lèvres ou de la langue pour moduler la mélodie des harmoniques. Une forte concentration musculaire augmente la clarté des harmoniques.

désincarné. Où résonne-t-elle? Dans le conduit vocal du chanteur? Dans l'espace physique environnant? Dans l'esprit de l'auditeur?

Rétroaction biologique

Le mécanisme du renforcement des harmoniques n'est pas totalement compris, mais il semble nécessiter au moins trois composantes corrélées : l'ajustement d'une harmonique au centre d'un formant prononcé ; l'allongement de la phase de fermeture du cycle ouverture-fermeture des cordes vocales ; la réduction de

l'intervalle des harmoniques affectées par le formant. Ces trois phénomènes intensifient le couplage entre la source et le filtre. N'importe qui peut les maîtriser et apprendre le chant de gorge (*voir l'encadré de la page 53*) : les populations turco-mongoles n'ont pas une physiologie qui leur donnerait l'apanage de ce chant.

Afin d'ajuster une des harmoniques avec un formant, le chanteur règle la fréquence fondamentale du bourdonnement produit par ses cordes vocales. Ce procédé est l'équivalent sonore du décalage d'une échelle afin d'amener l'un des barreaux au niveau

d'un repère fixe. Par l'analyse acoustique, on a étudié la précision de l'ajustement nécessaire : l'intensité d'une première harmonique précisément superposée au milieu du pic d'un formant est bien supérieure à celle d'une seconde harmonique légèrement décalée. Les chanteurs ajustent cette superposition en élevant ou en baissant le son fondamental jusqu'à ce qu'ils entendent résonner l'harmonique recherchée à une amplitude maximale.

Les chanteurs de gorge cherchent également à maîtriser la vibration des cordes vocales. Chaque cycle des

Chant diphonique, triphonique et... tétrapophonique

Depuis 30 ans, les musicologues occidentaux découvrent les effets des renforcements d'harmoniques à travers les prières des lamas tibétains, les chants diphoniques des Bachkirs, des Mongols et des Touvas, ainsi qu'avec la quintina sarde, où une cinquième voix «mystérieuse» surgit de la fusion des voix d'un quatuor de chanteurs.

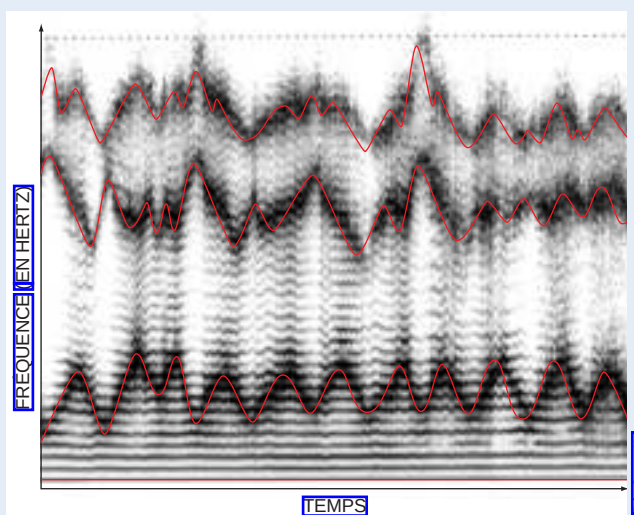
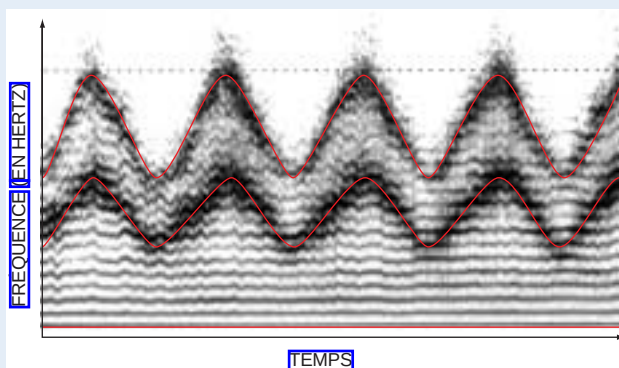
Le chant diphonique, que j'ai découvert en 1969 grâce aux enregistrements de Roberte Hamayon, de l'Université de Nanterre, superpose deux sons : un son fondamental, ou bourdon, qui conserve la même hauteur le temps d'une expiration, et une harmonique naturelle du son fondamental qui est amplifiée jusqu'à devenir audible. Cette harmonique a un timbre proche de celui d'une flûte (voix flûtée) ou de celui d'une guimbarde (voix guimbarde). Un chanteur seul chante ainsi simultanément à deux voix. Peut-on faire mieux en superposant trois ou même quatre voix?

Le chant diphonique nécessite plusieurs cavités, dont le couplage est à l'origine des fréquences aiguës de résonance des formants, qui sélectionnent et amplifient l'harmonique. Par exemple, avec la langue au repos – la bouche forme alors une seule grande cavité –, la deuxième voix ne dépasse guère 1 200 hertz. L'ambitus de la mélodie harmonique, c'est-à-dire que l'écart entre la note la plus grave et la note la plus aiguë, reste faible. L'étude des sonogrammes montre que l'intensité du formant s'étale sur trois ou quatre harmoniques. En revanche, lorsque la langue touche le palais, séparant ainsi la cavité buccale en deux parties, le formant est aigu et intense : l'harmonique supplémentaire est nettement audible.

Grâce aux sonogrammes, j'ai constaté qu'une troisième voix pouvait être produite (*voir la figure*). Cependant, cette troisième voix n'est pas commandée consciemment. Elle dépend de l'exécutant plutôt que d'une technique particulière. Le chant triphonique est possible lorsqu'un son très grave (par exemple, à une fréquence de 70 hertz) est émis : le chanteur peut alors créer deux formants qui sélectionneront chacun une harmonique. Par exemple, je peux chanter en mode triphonique avec un formant dans la zone de fréquence comprise entre 400 et 1 000 hertz, et un autre dans la zone au-dessus de 2 000 hertz. Par ailleurs,

j'étudie également le chant tétrapophonique : les quatre voix ne sont pas toutes audibles, mais elles sont reconnaissables sur le sonogramme.

Trần Quang HAI,
Laboratoire d'ethnomusicologie, CNRS, Paris



Dans ces deux sonogrammes de la voix de Trần Quang Hai, un son fondamental à 70 hertz constitue le bourdon (*les lignes horizontales en rouge*), tandis que des formants amplifient deux ou trois harmoniques (*les lignes sinusoïdales rouges*) selon que le chant est triphonique (*en haut*) ou tétrapophonique (*en bas*). Dans ce dernier cas, certaines harmoniques ne sont pas audibles.

cordes vocales commence lorsqu'elles sont resserrées. L'air comprimé par les poumons presse sur les cordes vocales, qui cèdent en s'écartant. Puis des forces élastiques et aérodynamiques referment les cordes tout en envoyant une bouffée d'air dans le conduit vocal. Des électroglottographes, qui utilisent des capteurs placés sur le cou pour analyser ce cycle, montrent que, lors du chant de gorge, les cordes vocales sont ouvertes pendant une fraction de cycle plus courte que pour une parole normale ; elles sont fermées plus longtemps. L'intensité des harmoniques aiguës est plus forte lorsque les muscles de la gorge sont contractés et rigides, c'est-à-dire qu'ils provoquent une fermeture brusque des cordes vocales. En outre, une fermeture plus longue prolonge la résonance dans le conduit vocal en réduisant le retour des ondes sonores vers les poumons. Ces deux effets réduisent l'affaiblissement de l'intensité aux fréquences élevées : l'harmonique recherchée est plus accentuée.

Enfin, l'isolement d'une harmonique ne serait pas aussi efficace sans les techniques que les chanteurs utilisent pour augmenter l'amplification et la sélectivité du conduit vocal. En affinant les propriétés de résonance normalement utilisées pour la prononciation des voyelles, les chanteurs décalent le pic des formants et augmentent sa sélectivité (voir l'encadré de la page 56). Ils renforcent ainsi les harmoniques alignées sur le pic étroit du formant, en affaiblissant simultanément les harmoniques situées en dehors de ce pic (voir la figure 4) ; une seule harmonique est alors amplifiée. De plus, en déplaçant leur mâchoire vers l'avant, tout en avançant, en amincissant et en arrondissant leurs lèvres, les chanteurs renforcent leurs cordes vocales, minimisent les pertes d'énergie (la bouche est presque fermée) et renvoient alors les résonances vers la vibration des cordes vocales : le pic de résonance du formant est encore augmenté.

Des études en vidéofluoroscopie (radiocinématographie) et en nasoendoscopie (une caméra miniature filme les cordes vocales) ont confirmé que les chanteurs modifient leur conduit vocal pour décaler la fréquence d'un formant et l'aligner avec une harmonique. En renforçant successivement différentes harmoniques, ils

produisent une mélodie. Les neuf musiciens de l'étude décalaient la fréquence de résonance du formant de quatre façons au moins. D'autres méthodes existent peut-être.

Dans la première, la pointe de la langue est placée derrière les dents du haut, pendant que la langue se bombe pour sélectionner successivement des harmoniques plus élevées. De plus, les chanteurs accordent avec précision le formant en entrouvrant périodiquement les lèvres. En République de Touva, le style de musique produit avec cette méthode est nommé *sygyt* (sifflement).

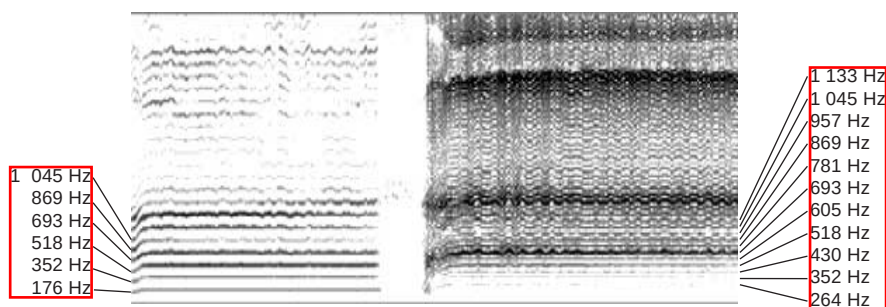
La deuxième méthode est celle du style *khöömei*. Les chanteurs avancent la langue (ce qui, dans la parole normale, change la voyelle «o» en «i») : le formant le plus bas baisse, tandis que le deuxième s'élève. En commandant avec précision la différence entre les deux formants, un musicien touva peut ajuster chacun d'eux à une harmonique différente, qui est alors amplifiée. Autrement dit, cette technique produit deux sons simultanés.

La troisième méthode requiert un mouvement de la gorge plutôt que de la bouche. Pour les harmoniques graves, les chanteurs placent la base de la langue vers le fond de la gorge, tandis que, pour les harmoniques moyennes et aiguës, ils déplacent la base de la langue vers l'avant jusqu'à créer un espace, nommé fossette, entre la base de la langue et l'épiglotte (la languette cartilagineuse qui empêche les aliments d'entrer dans les poumons). Pour les harmoniques aiguës, l'épiglotte avance pour fermer la fossette.

Dans la quatrième méthode, les chanteurs élargissent graduellement la bouche. Ainsi, ils raccourcissent le conduit vocal et élèvent la fréquence du premier formant. L'harmonique la plus aiguë qui puisse être renforcée est principalement limitée par des pertes de rayonnement, qui augmentent à mesure que la bouche s'élargit. Selon la hauteur du son fondamental, un chanteur peut isoler jusqu'à la douzième harmonique. Pour créer le style *kargyraa*, caractérisé



5. ARTY-SAYIR (en touva, «la rive opposée du lit d'une rivière asséchée») est une mélodie interprétée par le chanteur Vasili Chazir. Les nombres désignent les harmoniques au-dessus du fondamental : un do grave soutenu. La mélodie est environ un demi-ton plus basse.



6. UN CHANTEUR DISPOSE DE DEUX FOIS PLUS DE TONS lorsqu'il passe d'un chant normal (à gauche) au chant de gorge de style kargyraa (à droite). Les cordes vocales produisent un fa fondamental, à environ 176 hertz, tandis que les fausses cordes vocales du chanteur émettent un fa grave à l'octave inférieure, c'est-à-dire 88 hertz.

Les Burnett, d'après Theodore D. Levin

Bryan Christie, d'après Michael E. Edgerton

Les formants

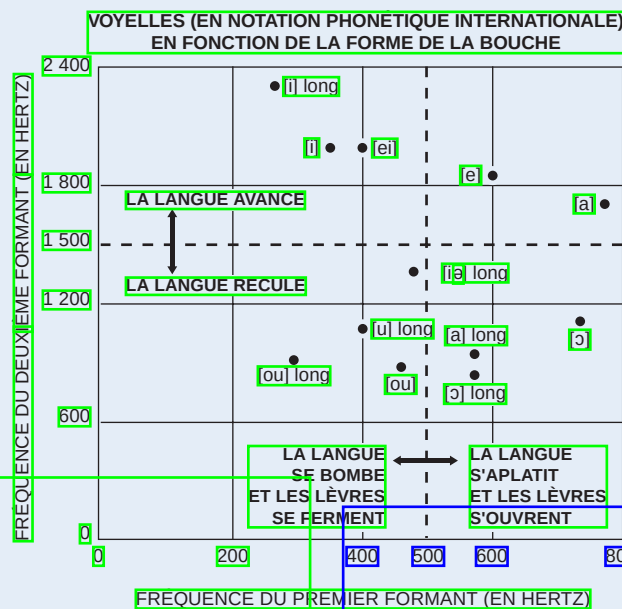
Bien que les cordes vocales produisent de nombreux sons, c'est le conduit vocal qui transforme les sons bruts en langage et en musique. Le conduit modifie le son des cordes vocales en sélectionnant parmi les composantes celles qui correspondent aux fréquences de résonance naturelle de l'air dans le conduit vocal. Lors d'une parole ou d'un chant, les déplacements de la langue ou des lèvres augmentent ou diminuent les fréquences de résonance, nommées fréquences des formants.

On perçoit bien ces mouvements quand on enchaîne les voyelles au cours d'une même expiration. La fréquence du premier formant est inversement

proportionnelle à la hauteur de la langue (il diminue lorsque la langue s'élève, par exemple lorsqu'on passe du son *a* de *tard* au son *i*). La fréquence du second formant est proportionnelle à l'avancement de la langue (elle augmente lorsque la langue avance, par exemple quand on passe du son *o* au son *i*). Le conduit vocal a un nombre théorique infini de formants, mais les combinaisons des deux ou trois premiers suffisent à expliquer la majeure partie des différences entre les sons des voyelles (voir la figure ci-dessus).

Comment les fréquences des formants sont-elles modifiées ? Imaginons que le conduit vocal soit un tube fermé à une extrémité (les cordes vocales) et ouvert à l'autre (les lèvres). À une section de tube constante, les fréquences de résonance sont uniquement déterminées par la longueur du tube. Par exemple, pour un tube de 17,5 centimètres de long (soit environ l'équivalent du conduit vocal d'un homme adulte), le pic du premier formant est à une fréquence de 500 hertz, celui du deuxième à 1 500 hertz, celui du troisième à 2 500 hertz, etc.

Chaque formant correspond à l'établissement d'une onde stationnaire à l'intérieur du tube : à chaque niveau du tube, les molécules de l'air oscillent de haut en bas sur une distance qui dépend de leur position. La pression varie dans l'espace de façon périodique : elle est constante en certains endroits, nommés nœuds de pression, où les molécules parcourent la plus grande distance pour maintenir cette pression constante. Les endroits où la pression subit ses plus



grandes fluctuations et où les molécules sont le plus immobiles, sont nommés antinœuds de pression (on peut négliger les mouvements aléatoires des molécules, car ils ne participent pas à l'établissement de l'onde stationnaire). L'extrémité inférieure du conduit, fermée, empêche les molécules de se déplacer, de sorte qu'elle constitue un antinœud, alors que l'extrémité ouverte sur l'extérieur est un nœud. Les formants se caractérisent par le nombre de nœuds et d'antinœuds de l'onde stationnaire (voir la figure en bas à droite).

Lorsque le tube est écrasé à un endroit, par exemple quand la langue se bombe, la fréquence

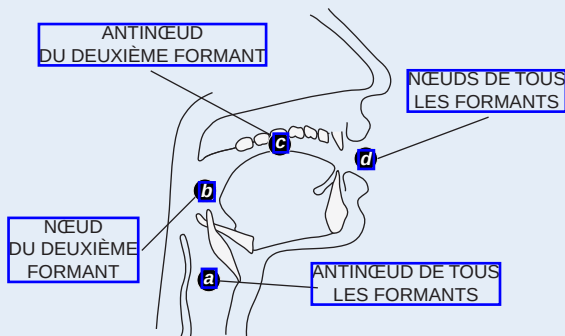
change proportionnellement à l'intensité de l'écrasement. Lord Rayleigh (1842-1919) a été le premier à expliquer ces mécanismes. Il montra notamment qu'un resserrement au niveau d'un nœud de pression réduit la fréquence du formant, tandis qu'un rétrécissement à l'endroit d'un antinœud de pression l'augmente (un élargissement produit les effets opposés).

Dans le premier cas, celui d'un resserrement à un nœud, les molécules traversent une ouverture réduite : quand la différence de pression qui les propulse reste identique, l'air est plus lent ; l'onde ralentit, donc sa fréquence diminue.

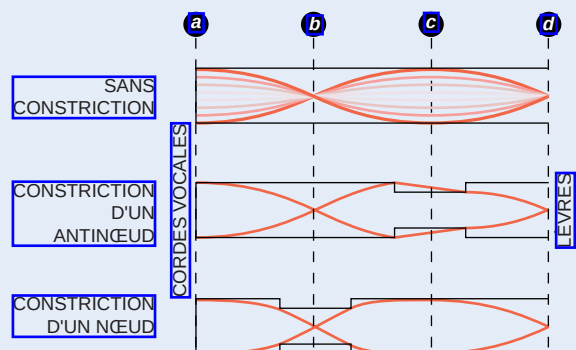
Dans le second cas, les molécules ne se déplacent pas, mais leur densité varie selon que les variations de pression attirent ou repoussent les molécules environnantes vers l'antinœud. L'écrasement réduit le volume du tube près de l'antinœud, l'addition d'un nombre donné de molécules produit donc une augmentation plus importante de la densité et de la pression : le système, devenu plus rigide, réagit plus rapidement ; la fréquence de l'onde augmente. La théorie des perturbations rend compte de la nouvelle forme de l'onde stationnaire (voir la figure en bas à droite).

Les chanteurs de gorge appliquent fréquemment ces principes : lorsqu'ils appuient la base de la langue contre le fond de la gorge, à l'endroit d'un nœud du deuxième formant, ils diminuent la fréquence de ce formant (voir la figure en bas à gauche). Dans le style *sygyt*, ils bombent la langue, rétrécissant ainsi l'antinœud du deuxième formant, dont la fréquence augmente alors.

POSITION DES NŒUDS ET DES ANTINŒUDS
DANS LE CONDUIT VOCAL



MOTIFS DES ONDES STATIONNAIRES
DU DEUXIÈME FORMANT





7. CES CHAMANS TOUVAS utilisent de nombreux objets sonores pour le traitement des âmes. L'animisme a façonné la musique touva et a contribué à perpétuer la coutume du chant de gorge.

par le renforcement d'harmoniques très élevées, les Touvas combinent cette technique avec une seconde source vocale.

À deux voix

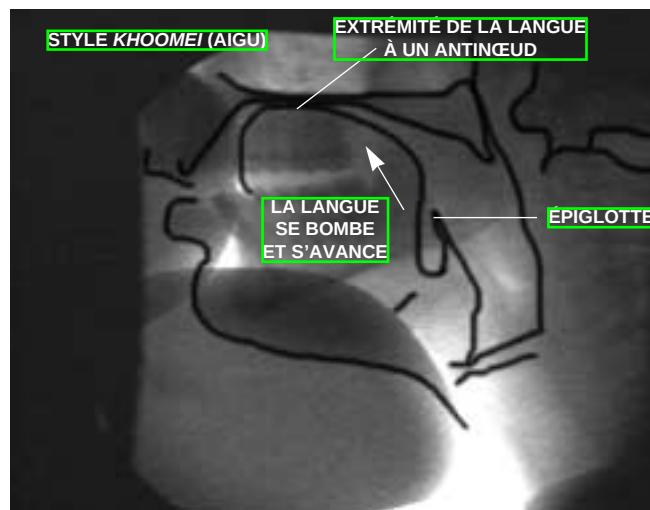
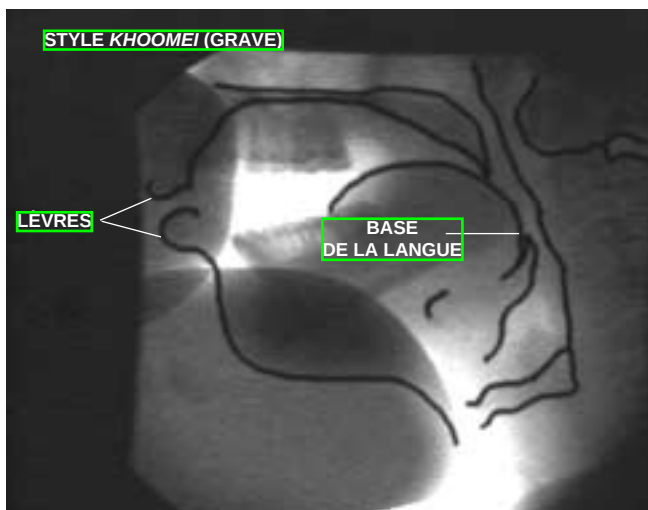
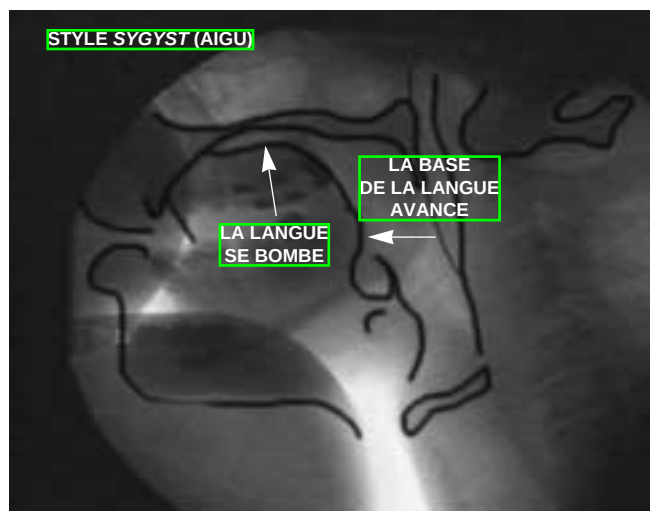
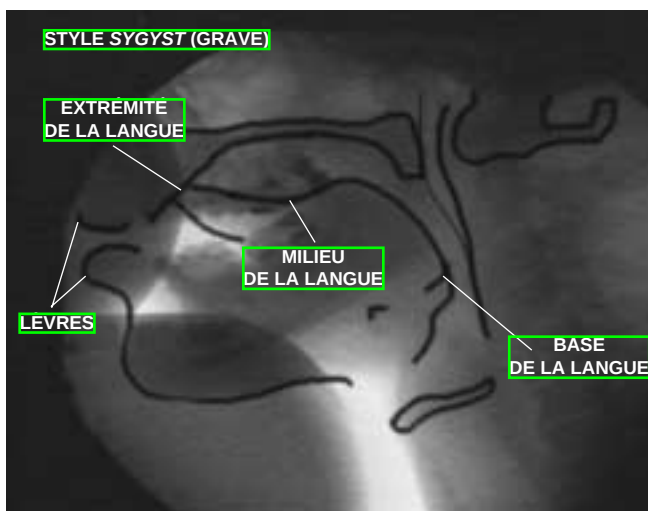
Plusieurs organes du conduit vocal peuvent être cette seconde source vocale qui émet un deuxième son brut. Le style *kargyraa* utilise la paire de tissus flexibles, nommés fausses cordes vocales, situés au-dessus des cordes vocales, capables eux aussi de fermer le passage au flux d'air. Sont également sollicités les cartilages aryténoïdes situés à l'arrière de la gorge et dont les mouvements contrôlent la phonation, les cordes aryépiglottiques, qui relient les cartilages aryténoïdes à l'épiglotte, et la base de l'épiglotte (voir la figure 2).

En raison de sa ressemblance avec le son des chants des moines tibétains, des ethnomusicologues nomment musique modale le style *kargyraa*. Il associe souvent à la fréquence du son fondamental une fréquence deux fois inférieure, car les fausses cordes vocales se ferment une fois toutes les deux fermetures des cordes vocales. Par exemple, un *do* fondamental produit par les cordes vocales à une fréquence de 130,8 hertz est associé au *do* à 65,4 hertz émis par les vibrations des fausses cordes vocales (voir la figure 6). L'analyse des spectres sonores confirme cette description : lorsqu'un chanteur passe en musique modale, le nombre de composantes

sonores double : la seconde source est périodique, à une fréquence deux fois inférieure à celle du son normal. La musique modale modifie également les propriétés de résonance du conduit vocal : comme l'utilisation des fausses cordes vocales raccourcit le conduit vocal de un centimètre, les fréquences des formants sont décalées vers le haut ou vers le bas selon l'endroit où se situe la constriction du formant choisi.

L'intérêt des Touvas pour le chant de gorge est déterminé par le monde sonore qu'il exprime. La musique reflète les préférences culturelles, individuelles et sociales, ainsi que les capacités physiques. Par exemple, entre les sixième et douzième harmoniques des sept notes de la gamme – le segment du spectre du répertoire des chanteurs touvas et mongols – les interprètes évitent scrupuleusement les septième et onzième harmoniques, car la syntaxe musicale locale privilégie les mélodies pentatoniques (à cinq tons).

De plus, les Touvas apprécient les pauses prolongées entre les respirations ; ces arrêts, qui durent parfois jusqu'à 30 secondes, paraissent trop longues à l'auditeur occidental, qui y voit des interruptions de la mélodie. Pour les musiciens touvas, en revanche, les phrases ne forment pas un morceau de musique continu, mais chacune d'entre elles est une image sonore indépendante. Pendant les pauses, le chanteur écoute les sons ambiants pour ensuite formuler une réponse... et il reprend son souffle.



8. LA RADIOGRAPHIE AUX RAYONS X montre le mécanisme du chant de gorge. Dans le style sygyt (*en haut*), les chanteurs gardent la pointe de la langue plaquée contre les dents du haut. En bombant la langue et en avançant la base de la langue, ils passent des harmoniques graves

(*en haut, à gauche*) aux harmoniques aiguës (*en haut, à droite*). Dans le style khöömei (*en bas*), le ton monte lorsque la langue entière se déplace de la position basse et arrière (*en bas, à gauche*) vers la position haute et avant (*en bas, à droite*).

Les différents styles sont tous inspirés de l'idée esthétique centrale d'imitation des sons. Le chant de gorge n'est que l'un des moyens utilisés par les éleveurs-chasseurs pour interagir avec leur environnement acoustique naturel. Les Touvas emploient également des vocalisations variées pour imiter les cris des animaux sauvages et domestiques. Ils jouent d'instruments tels l'*ediski*, un roseau qui imite la femelle du chevreton porte-musc, le

khirlee, une mince pièce de bois que l'on tourne pour reproduire le bruit du vent, l'*amyrga*, un cor de chasse qui simule le brame du cerf, et le *chadagan*, une cithare que le vent fait résonner lorsque les bergers touvas la placent sur le toit de leur yourte. Les joueurs de *khomus*, une sorte de guimbarde, imitent également les sons humains, notamment la parole : les bons joueurs de *khomus* codent des textes qu'un auditeur expérimenté comprend.

C'est toutefois dans le chant de gorge que les Touvas reconnaissent l'aboutissement de l'imitation, l'élément vénéré d'un langage expressif qui commence là où s'arrête le langage parlé. Pour les bergers, il exprime les sentiments de jubilation et d'indépendance que les mots ne peuvent formuler. La paix intérieure s'épanouit au milieu des contraintes les plus strictes, qui sont ici les limites physiques des gammes d'harmoniques.

Theodore LEVIN est professeur d'ethnomusicologie au collège Dartmouth. Michael EDGERTON est compositeur.

Des extraits sonores et vidéo sont disponibles sur le site Internet : <http://www.sciam.com/1999/0999issue/0999levinissue.html>
Trân QUANG HAI et Hugo ZEMP, *Le*

chant des harmoniques, film produit par le CNRS et le musée de l'Homme, 1989. Ingo R. TITZE, *Principles of Voice Production*, Prentice Hall, 1994.

Mark VAN TONGEREN, *A Tuvan Perspective on Throat Singing*, in *Oideion: The Performing Arts Worldwide*, vol. 2, pp. 293-312, sous la direction de Wim van Zanten et Marjolijn van Roon,

Centre of Non-Western Studies, University of Leiden, 1995.

Galsan TSCHINAG, *Ciel bleu, une enfance dans le Haut-Altai*, Anne-Marie Métailié, 1996.

Theodore LEVIN, *The Hundred Thousand Fools of God: Musical Travels in Central Asia (and Queens, New York)*, Indiana University Press, 1997.



L'enseignement des sciences

WAYT GIBBS • DOUGLAS FOX

Une enquête internationale menée dans une cinquantaine de pays a montré que les lycéens français ont de bons scores en mathématiques. En revanche, ils sont plutôt mal classés en sciences.

Depuis la fin des années 1940, de nombreux pays se lamentent cycliquement : le niveau des étudiants baisse dans les matières scientifiques. Le pessimisme a atteint son paroxysme, aux États-Unis, en 1957, quand l'Union soviétique a lancé le premier *Sputnik*. Les Américains étaient persuadés que les Russes étaient de bien meilleurs scientifiques qu'eux, notamment parce que l'enseignement dispensé aux lycéens était plus rigoureux en sciences et en mathématiques. Puis le Japon les inquiéta : les Japonais, eux, avaient su enseigner les sciences appliquées à leurs étudiants, et ils maîtrisaient désormais les techniques nouvelles.

Si les circonstances qui déclenchent les crises varient, quelques éléments demeurent. Chaque fois, le corps enseignant tire la sonnette d'alarme. De plus en plus de pays se demandent si leur système éducatif est adapté aux valeurs et aux enjeux de leur société. On s'interroge sur les connaissances réellement acquises par les jeunes, sur les moyens qui sont mis ou que l'on devrait mettre à leur disposition pour satisfaire les exigences auxquelles ils seront soumis au cours de leur vie professionnelle.

En analysant les rapports sur l'enseignement publiés au cours des 30 dernières années, Gregory Cizek, de l'Université de Toledo, a dénombré plus de 4 000 livres et articles où les enseignants déplorent la baisse du niveau des élèves. Une autre question revient périodiquement : à quel point

la réussite économique d'un pays dépend-elle du niveau scientifique et technique de ses étudiants ? Selon G. Cizek, la domination économique et scientifique des États-Unis s'effrite parce que les universités ne produisent plus assez de scientifiques, d'ingénieurs et de techniciens de haut niveau. Ce manque de bons scientifiques menacerait le développement économique et limiterait l'augmentation du niveau de vie. Une des difficultés vient sans doute du fait que, dans les périodes de crise, on préfère mettre en chantier de vastes réformes dont les fondements sont fragiles plutôt que des réformes plus limitées, mais sans doute plus efficaces.

En fait, le niveau en mathématiques et en sciences des élèves parvenant en fin d'études secondaires a-t-il vraiment baissé ? D'après un test réalisé à l'échelon national, aux États-Unis, le niveau des élèves est meilleur qu'il y a dix ans, et, en moyenne, les jeunes adultes ont davantage de connaissances en sciences fondamentales que leurs parents ou leurs grands-parents.

Entre 1980 et 1995, le nombre des lycéens américains a augmenté de près de 30 pour cent, malgré la baisse du nombre des adolescents. En France, si le nombre des collégiens est resté quasiment stable pendant cette période, le taux d'accès au baccalauréat a plus que doublé, atteignant 68 pour cent d'une classe d'âge, et la proportion de ceux qui obtiennent un niveau de formation reconnue (brevet

d'enseignement professionnel, certificat d'aptitude professionnelle ou baccalauréat) a atteint 91 pour cent. Depuis une dizaine d'années, le nombre de maîtrises obtenues en sciences et technique a augmenté, en France comme aux États-Unis.

Un demi-million d'étudiants dans 50 pays

Pour évaluer objectivement le niveau en mathématiques et en sciences des élèves de fin d'études secondaires, 500 000 jeunes d'une cinquantaine de pays de tous les continents ont participé à une étude internationale, la Troisième étude internationale sur les mathématiques et sur les sciences (TIMSS), organisée sous l'égide de l'IEA, l'Association internationale pour l'évaluation du rendement scolaire. Trois « populations » d'élèves constituaient cette cohorte : des élèves de neuf ans, de 13 ans et de fin d'études secondaires. La France a participé à l'évaluation des élèves de 13 ans, c'est-à-dire des collégiens des classes de cinquième et de quatrième, et des élèves de fin d'études secondaires d'enseignement général, technologique et professionnel.

Les élèves devaient répondre à diverses questions à choix multiple ou à des questions ouvertes, où l'on ne

1. EXPÉRIMENTATIONS en milieu naturel et en classes de travaux pratiques doivent aider les élèves à élaborer leur culture générale en sciences.



© Pearson Education, Inc. All rights reserved.

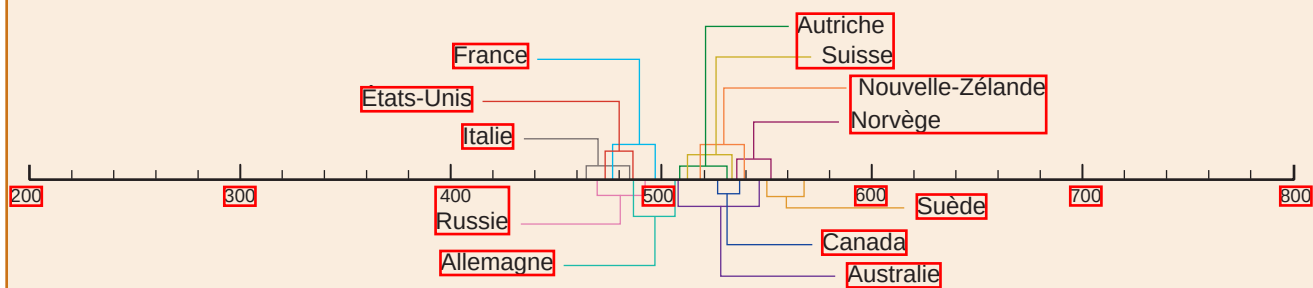


© Pearson Education, Inc. All rights reserved.



© Pearson Education, Inc. All rights reserved.

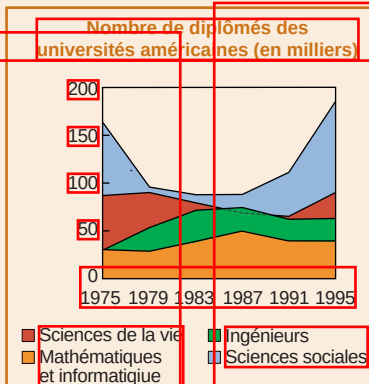
Comparaison des résultats obtenus en fin d'études secondaires



2. LES RÉSULTATS globaux obtenus par les lycéens des différents pays qui ont participé aux tests comparatifs sont voisins. Les Suédois viennent en tête. La France, les États-Unis et l'Italie obtiennent des résultats comparables si l'on tient compte des marges d'erreurs.

La recherche américaine n'est pas en crise

Quel que soit le niveau des lycéens en sciences et en mathématiques, les universités américaines ne manquent pas d'élèves brillants. Le nombre de doctorats en sciences et de diplômés d'ingénieur délivrés a augmenté de 130 pour cent depuis 1966, tandis que la population des États-Unis n'a progressé que de 35 pour cent. Les progrès ont été plus marqués dans certaines disciplines, les thésards en physique ayant diminué de 27 pour cent depuis 1992. Selon Patrick Mulvey, de l'Institut de physique américain, cette évolution reflète une diminution du nombre d'offres d'emploi dans l'industrie de l'armement et dans les industries dérivées, depuis la fin de la guerre froide.



La situation aux États-Unis est encore compliquée par le fait que, traditionnellement, ce pays accepte de nombreux étudiants en thèse, voire même après la thèse, et que la proportion des étudiants qui veulent rester après leur thèse augmente. En 1996, près de 68 pour cent des étudiants étrangers ayant obtenu un doctorat scientifique ou technique voulaient s'installer aux États-Unis, contre 49 pour cent en 1980.

Dans d'autres disciplines, un excès de thésards serait plus à craindre qu'un manque. Ainsi, en France comme aux États-Unis, la sonnette d'alarme doit être tirée en biologie. En 1988, le département américain de la recherche a demandé de limiter le nombre de thèses en biologie.

proposé pas un choix de réponses (voir l'encadré page 66). Ces tests évaluaient les connaissances générales en mathématiques, les connaissances générales en sciences et la capacité de raisonnement de l'ensemble des élèves en fin d'études secondaires ; s'y ajoutaient des questions sur l'environnement et sur la société. Les lycéens répondaient également à un questionnaire sur leur environnement social et culturel, sur leurs opinions et attitudes par rapport aux mathématiques et aux sciences, et sur certains aspects des méthodes pédagogiques utilisées par leurs enseignants.

Selon William Schmidt, qui a coordonné l'enquête aux États-Unis, une telle étude – largement soutenue et prise en compte par le gouvernement américain – présente l'intérêt de clarifier comment les différentes méthodes d'enseignement modèlent les connaissances des élèves. Toutefois, les résultats de cette enquête, due à une collaboration internationale solide, doivent être interprétés avec quelque précaution : l'âge des élèves, le nombre d'heures de cours, la structure des études, les programmes et les types d'enseignement pris en compte dans l'étude varient notablement d'un pays à l'autre.

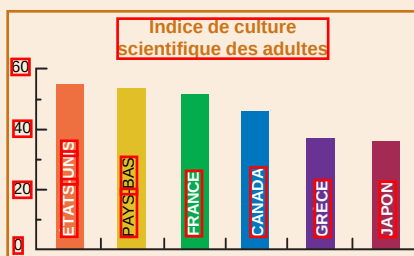
Dans les pays qui ont les scores les meilleurs, les élèves sont parfois plus âgés, mais ne font pas de petits métiers pour payer leurs études, ce qui est souvent le cas aux États-Unis. Toutefois, l'étude n'a pas montré que les résultats sont meilleurs quand on allonge la durée des études ni quand on offre des allocations aux étudiants – c'est le cas en Suède.

Certains ingrédients considérés comme nécessaires et suffisants à l'obtention de bons résultats ont été remis en question par l'étude. Dans les pays obtenant les meilleurs scores, les

Non, le niveau ne baisse pas

Contrairement au dogme, le niveau des élèves en sciences ne baisse pas. D'après une étude conduite par Jon Miller, à Chicago, la culture scientifique des adultes a augmenté depuis 1985, et les résultats obtenus à des tests de culture scientifique générale par des jeunes de 18 à 29 ans sont meilleurs que les résultats des plus de 40 ans. Les résultats obtenus en mathématiques et en sciences par des jeunes de 17 ans sont un peu meilleurs que les résultats de 1982, mais restent inférieurs aux résultats de tests datant de la fin des années 1960. Toutefois, même dans les pays qui obtiennent les meilleurs scores, beaucoup d'étudiants ne savent pas répondre à des questions telles que : qu'est-ce qu'une

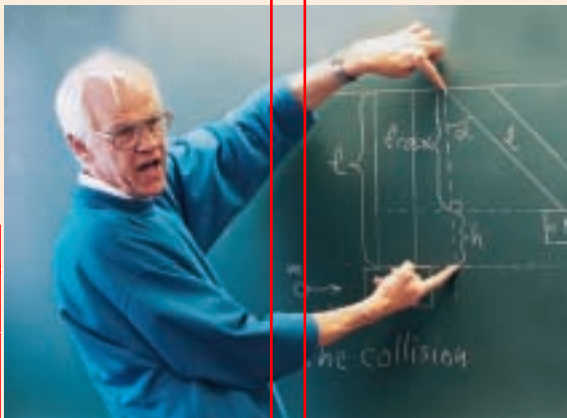
molécule ? (11 pour cent seulement de réponses correctes) ; qu'est-ce que l'ADN ? (22 pour cent de réponses correctes) ; les lasers fonctionnent-ils avec des ondes sonores ? (39 pour cent) ; quelle est la durée d'une révolution de la Terre autour du Soleil ? (48 pour cent).



Pour une culture scientifique générale

L'enseignement des sciences de la nature (de la physique, de la chimie ou de la biologie) s'effectue parfois en trois étapes : les professeurs commencent par enseigner les concepts ; puis ils les illustrent par des exercices qu'ils résolvent au tableau et ils donnent des exercices d'application ; enfin, ils donnent des instructions précises pour que les élèves fassent des expériences dont ils connaissent déjà le résultat. Diverses études ont montré que les élèves, face à une information nouvelle, ne raisonnent pas de la même façon que les adultes. Quand on dit à un enfant que la densité d'un objet est égale à sa masse divisée par son volume, il pense au «volume» de son baladeur, ou à son frère qui l'a qualifié, la veille, de «lourd». Les enfants se sentent parfois frustrés de ne pas comprendre le sens même des mots.

D'autres approches, où l'expérience vient en premier, semblent préférables. On peut notamment encourager les élèves à explorer eux-mêmes un phénomène. L'enseignant cherche ensuite à aider les élèves à formuler des hypothèses sur ce qu'ils ont observé. Alors seulement le professeur formalise le problème étudié. D'autres expériences, divers problèmes, des lectures complémentaires font ensuite le lien entre ce nouveau savoir et les expériences de la vie quotidienne.



Les élèves qui bénéficient de ce type d'enseignement semblent retenir mieux ce qu'ils apprennent, apprécier davantage les sciences, atteindre des niveaux de raisonnement supérieurs et mieux résoudre les problèmes scientifiques de la vie courante. Il semble également que la culture scientifique générale soit meilleure quand les enseignants se limitent à quelques concepts fondamentaux, ce qui leur laisse du temps pour élaborer avec les élèves des projets à long terme qui font le lien entre la science du laboratoire et celle que l'on côtoie tous les jours.

Lorsque les élèves abordent les sciences physiques, ils ont parfois des idées fausses sur le fonctionnement du monde. Certains pensent que des matériaux, telle la laine, sont intrinsèquement chauds, tandis que d'autres, par exemple les métaux, sont froids. Même un cours ne réussit souvent pas à battre en brèche ces idées fausses. Pour les combattre, certains enseignants proposent aux enfants d'exposer leurs idées, qu'ils utilisent comme point de départ pour des expériences qui leur servent à exposer des hypothèses scientifiques. Les enseignants doivent posséder parfaitement leur sujet pour rendre cette approche efficace. Quand ils y parviennent, les élèves résolvent beaucoup mieux les problèmes de physique.

TIMSS : des années de coopération internationale

L'enquête TIMSS a-t-elle été l'objet d'une compétition internationale acharnée, ou bien chaque pays s'est-il enrichi des réflexions des autres participants ? Selon Anne Servant, du ministère de l'Éducation nationale, de la Recherche et de la Technologie, qui a coordonné l'étude pour la France, des pédagogues d'horizons et de pays variés ont participé, dès 1991, à la mise en place d'un cadre général de contenus et de compétences accepté par tous. Plusieurs comités spécialisés dans divers domaines ont été créés, regroupant de nombreux partenaires. Loin de se borner à des tests proposés aux élèves, l'enquête a recueilli un grand nombre d'informations sur les opinions des élèves et des professeurs, et sur les pratiques pédagogiques. Une analyse comparative approfondie des programmes d'enseignement a été menée.

Les réunions bisannuelles de représentants de tous les pays et de compétences diverses ont permis de confronter différentes problématiques. Ainsi, en 1993, près de 700 exercices destinés aux élèves de 13 ans ont été traduits dans toutes les langues et expérimentés, puis revus, corrigés, discutés durant des années en fonction des différentes remarques formulées. L'élaboration d'exercices adaptés aux élèves de fin d'études secondaires des différents systèmes éducatifs a été ardue.

Les informations recueillies au collège montrent que les sciences n'occupaient pas, en France, en 1995, la place qu'elles avaient dans l'environnement social d'autres pays : la France était le dernier pays sur 37 où les professeurs considéraient comme important que les élèves fassent preuve de créativité, le trente-quatrième à considérer que la science est un guide pratique et structuré pour traiter des problèmes concrets, le troisième pays sur 39 où les élèves et leur entourage considéraient qu'il est plus important de réussir en mathématiques qu'en sciences.

Les résultats obtenus par les élèves français de 13 ans ont été médiocres. Même si peu d'exercices de sciences correspondaient aux programmes de ces élèves, les résultats n'étaient guère meilleurs quand on ne retenait que les exercices correspondant au programme, et le classement changeait peu. En Corée, de nombreux exercices ne correspondaient pas non plus au programme ; pourtant les collégiens ont bien réussi. Il semble que, dans ce pays, les sciences occupent une bonne place dans l'environnement social (émissions de télévision consacrées aux sciences, par exemple).

À la fin des études secondaires, l'enquête a donné des informations sur les connaissances générales de l'ensemble des jeunes en mathématiques et en sciences, et des épreuves spécifiques ont été réservées aux lycéens de la série S. Les résultats médiocres en connaissances générales, très bons en mathématiques, mais faibles en physique sont peut-être la suite de certaines constatations faites au collège.

Grâce à TIMSS, une voie d'échanges approfondis entre les pays des divers continents a été ouverte. C'est à ce besoin d'ouverture qu'ont répondu les établissements scolaires : ils ont activement pris part à l'enquête à une période de l'année où les élèves passent le baccalauréat, et la mise en place de l'étude dans toutes les filières n'a pas été aisée. Le ministère français de l'Éducation nationale s'est engagé dans l'étude, souhaitant bénéficier d'informations complémentaires dans un processus général de réflexion ; depuis, il a poursuivi cet effort et l'a approfondi, voulant doter le pays de tous les moyens de réflexion sur un enseignement de mieux en mieux adapté aux besoins des jeunes face à la société moderne.

étudiants ont, en moyenne, moins de devoirs à faire à la maison que dans les pays où les résultats sont moins bons, et les effectifs des classes sont souvent supérieurs. En Suède, plus de 40 pour cent des élèves de classes à dominante scientifique ont déclaré avoir des devoirs de mathématiques à faire à la maison moins d'une fois par semaine, tandis qu'aux États-Unis plus de 80 pour cent des élèves font des devoirs plus de trois fois par semaine. Parmi les pays qui donnent le plus de devoirs à la maison, la France est troisième.

La Suède est en tête du classement dans les épreuves de culture générale de mathématiques et de sciences, tandis que la Fédération de Russie et les États-Unis ont des résultats inférieurs

à la moyenne internationale. Si, en France, plus de 85 pour cent des élèves «généralistes» (toutes sections confondues) testés faisaient régulièrement des mathématiques et des sciences, cette proportion ne dépassait pas 65 pour cent en mathématiques pour les Pays-Bas ou les États-Unis, et 50 pour cent en sciences pour les États-Unis, le Canada ou la Suède. Les lycéens qui ont les meilleurs résultats sont ceux qui ont l'habitude de faire beaucoup d'exercices de raisonnement.

Les jeunes Américains ont eu des scores un peu inférieurs à ceux des jeunes des autres pays testés lors de questionnaires à choix multiples sur des questions scientifiques et techniques élémentaires. Toutefois, des

scores élevés à ces tests ne prouvent pas nécessairement que l'étudiant ait une culture scientifique solide ni qu'il soit apte à résoudre les problèmes concrets. L'enseignement des sciences sert depuis longtemps à sélectionner les élèves les plus brillants et les plus motivés, ceux qui mémorisent facilement les formules. Ce n'est qu'une sélection pour les études supérieures, pas une préparation à la vie.

Niveau scientifique et compétitivité économique

L'étude ne semble pas montrer que la façon dont sont enseignées les sciences influe sur la productivité ou sur la compétitivité d'un pays. Deux études indépendantes sur la santé économique de

Les résultats de l'enquête internationale pour la France

La Troisième étude internationale sur les mathématiques et sur les sciences a classé les lycéens français de terminale S premiers en mathématiques : 16 pays ont fait passer aux élèves des classes terminales à dominante scientifique des tests de haut niveau en mathématiques et en physique, et des tests moins difficiles de culture générale en mathématiques et en sciences. Ainsi, les lycéens français de terminale S sont premiers en mathématiques, mais passent à la cinquième place avec les questions de «culture générale en mathématiques», et à la treizième pour les questions de physique, avec une moyenne très inférieure à la moyenne internationale. Ces élèves semblent d'autant plus à l'aise que le sujet est abstrait.

Dans l'ensemble, les élèves de l'enseignement général obtiennent de meilleurs résultats que ceux de l'enseignement technologique et de l'enseignement professionnel, mais certaines sections de l'enseignement technologique ont des résultats équivalents à ceux des terminales ES, à dominante économique, de l'enseignement général. En ce qui concerne les sciences, les proportions de réussite, pour toutes les séries, sont plus élevées pour les sciences de la vie et de la terre que pour la physique et la chimie.

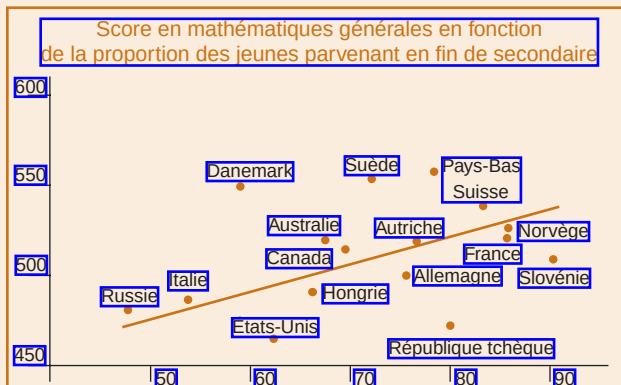
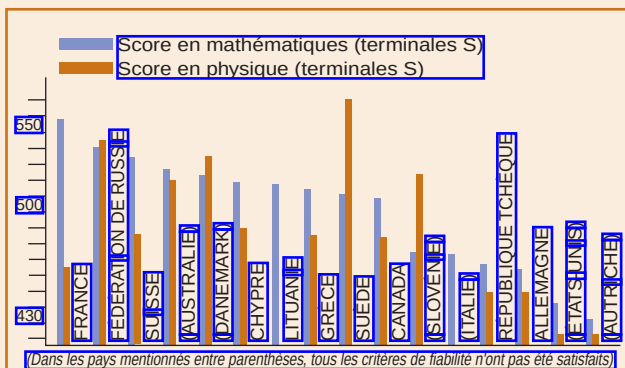
Dans toutes les sections, sauf en terminale littéraire et en BEP, les élèves préfèrent les mathématiques aux sciences. En sciences, les élèves préfèrent les sciences de la vie aux sciences

de la terre, la physique et la chimie étant les moins appréciées. Les élèves ont souvent des difficultés à résoudre certains exercices liés à la vie quotidienne et à l'environnement. Les garçons réussissent mieux que les filles : sur l'ensemble des élèves, on note une différence de 40 points en faveur des garçons, en mathématiques et en sciences, même dans les classes de terminales scientifiques.

En France, l'ensemble des élèves de fin d'études secondaires a obtenu en mathématiques un score de 523 et en sciences un score de 487, ce qui classe le pays au septième rang en mathématiques, mais à nouveau au treizième rang en sciences sur 21 pays.

Comment les résultats obtenus sont-ils liés à la proportion d'une génération qu'un pays fait parvenir en fin d'études secondaires ? D'après les données obtenues, et contrairement à ce que l'on aurait pu attendre, les résultats ne sont pas meilleurs quand l'accès en fin d'études secondaires est limité, c'est-à-dire quand la sélection est forte. La tendance semble même inverse. En France, 84 pour cent d'une classe d'âge parvient en fin d'études secondaires.

D'après des données dont l'analyse statistique a été réalisée par Fabrice Murat, alors au ministère de l'Éducation nationale, de la recherche et de la technologie - Direction de la programmation et du développement.



Quelques exemples d'exercices proposés aux collégiens

En mathématiques :

«Si m représente un nombre positif, quelle est l'expression égale à $m+m+m+m$?»

- a – $m + 4$
- b – $4m$
- c – m^4
- d – $4(m + 1)$

«Il y a 28 élèves dans une classe. La proportion de filles par rapport aux garçons est de 4 pour 3. Combien y a-t-il de filles dans la classe?»

En physique :

«En mer, les équipages de deux bateaux peuvent communiquer en criant. Pourquoi est-ce impossible pour les équipages de deux vaisseaux spatiaux séparés par la même distance dans l'espace?»

- a – Le son est plus réfléchi dans l'espace
- b – La pression est trop élevée à l'intérieur des vaisseaux spatiaux

c – Les vaisseaux spatiaux voyagent plus vite que le son

d – Il n'y a pas d'air dans l'espace pour permettre au son de se déplacer.

En sciences de la vie et de la terre :

«Quelle est la fonction de la chlorophylle dans une cellule végétale?»

- a – Absorber l'énergie lumineuse et produire de la nourriture
- b – Enlever les déchets par un transport actif
- c – Produire de l'énergie chimique à partir de la nourriture
- d – Contrôler la forme de la cellule

«Les combustibles fossiles se sont formés à partir...?»

- a – d'uranium
- b – d'eau de mer
- c – de sable et de graviers
- d – de plantes et d'animaux morts

Quelques exercices proposés aux lycéens de fin d'études secondaires

En sciences (culture générale) :

«Certaines chaussures à talons hauts ont la réputation d'abîmer les sols. Le diamètre à la base de ces très hauts talons est d'environ 0,5 centimètre, et il est d'environ 3 centimètres pour les talons ordinaires. Expliquer brièvement pourquoi les très hauts talons peuvent abîmer les sols.»

«L'énergie nucléaire peut être produite par fission ou par fusion. La fusion n'est pas couramment utilisée comme source d'énergie dans les réacteurs. Pourquoi?»

- a – Les principes scientifiques sur lesquels la fusion est basée ne sont pas encore connus
- b – Les procédés technologiques d'utilisation sans danger de la fusion ne sont pas développés
- c – Les matières premières nécessaires ne sont pas aisément disponibles
- d – Les déchets produits par le processus de fusion sont trop dangereux

«Les CFC (chlorofluorocarbones) ont révolutionné la vie personnelle et industrielle ces 30 dernières années. Ils ont servi de réfrigérant dans les réfrigérateurs et de propulseur dans les aérosols, les emballages sous pression et les extincteurs. Il y a maintenant de très forts mouvements internationaux pour arrêter l'utilisation de ces substances, parce qu'...?»

- a – elles sont chimiquement inertes

b – elles contribuent à l'effet de serre

- c – elles sont toxiques pour les humains
- d – elles détruisent la couche d'ozone

En mathématiques (série S seulement) :

«Quelles sont toutes les valeurs de x pour lesquelles l'inéquation $5x + 5/3 \leq -2x - 2/3$ est vraie?»

- a – $x \leq -7/9$
- b – $x \leq -1/3$
- c – $x \geq 0$
- d – $x \geq 7/3$
- e – $x \geq 9/3$

«Dans un repère orthonormal, les sommets du triangle PQR sont les points : P(1;2), Q(4;6) et R(-4;12). Parmi les phrases suivantes, laquelle est vraie pour le triangle PQR?»

- a – PQR est un triangle rectangle en P
- b – PQR est un triangle rectangle en Q
- c – PQR est un triangle rectangle en R
- d – PQR n'est pas un triangle rectangle

«Un examen consiste en 13 questions. Un étudiant doit répondre seulement à une des deux premières questions et seulement à neuf des questions restantes. Combien de choix de questions l'étudiant a-t-il?»

- a – $C_{13}^{10} = 286$
- b – $C_{11}^8 = 165$
- c – $2 \times C_{11}^8 = 110$
- d – $2 \times A_{11}^2 = 220$
- e – Un autre nombre

différents pays ont placé les États-Unis soit à la première place, soit à la deuxième derrière Singapour. Le mérite en fut attribué aux scientifiques qui avaient terminé leurs études depuis une vingtaine d'années, mais pas aux enseignants.

On admet souvent, tel un axiome, que les connaissances en mathématiques et en sciences des lycéens déterminent la santé économique d'un pays. Toutefois, plusieurs arguments semblent aller à l'encontre de cette croyance : dans les rapports évaluant la compétitivité d'un pays, on constate souvent que de nombreux critères de réussite, telle la qualité de l'infrastructure portuaire, viennent bien avant la qualité de l'enseignement ou la compétence des scientifiques ou des ingénieurs. Face à l'urgence, plus de 1 000 lois ont été promulguées aux États-Unis depuis 1970 pour réformer le système éducatif, mais elles semblent avoir eu peu d'effets sur les connaissances scientifiques acquises par les lycéens.

Si le niveau des élèves en sciences ne paraît pas baisser, la culture scientifique qu'ils acquièrent ne leur est peut-être pas utile dans la vie de tous les jours. Nous pensons que les étudiants qui veulent devenir des scientifiques auraient encore le temps, après le lycée, d'apprendre les théories et les faits scientifiques. En revanche, tous les lycéens devraient apprendre à réfléchir, à distinguer le fait de l'opinion, la probabilité de la certitude, la déduction rationnelle de la superstition, les données des suppositions, la science du folklore, la théorie du dogme.

Wayt GIBBS est journaliste à *Scientific American*. Douglas FOX est journaliste scientifique.

A. BEATON et al., *Mathematical and Science Achievement in the Final Year of Secondary School*, IEA, TIMSS International Study Center, Boston College, Chestnut Hill, Ma., USA, février 1998.

Les dossiers d'éducation et formation. Évaluation internationale en mathématiques et en sciences en classes de cinquième et quatrième, ministère de l'Éducation nationale, de la Recherche et de la Technologie, Direction de la programmation et du développement, n° 99, juin 1998.

L'état de l'école, ministère de l'Éducation nationale, octobre 1998.

Pourquoi les objets se cassent-ils?

MARK EBERHART

Depuis près d'un siècle, les physiciens utilisent la théorie des liaisons chimiques pour prévoir quand un solide se brise ou se déforme. Aujourd'hui, on calcule même le type de dégradation qui se produira.

Un objet qui se brise ou qui se tord est une petite catastrophe. Pour moi, au contraire, c'est un plaisir : en regardant du verre brisé, je me surprends à assembler mentalement les morceaux, à la recherche de l'origine de la fracture ; devant un vieil arbre, j' imagine comment sa croissance a lentement déplacé la clôture en fer voisine. Je n'ai pas un goût pervers de la destruction, mais je cherche à savoir quand les matériaux sont fragiles et cassent facilement, comme le verre, ou sont ductiles et nécessitent plus d'énergie pour se bri-

ser, comme le fer. Les objets que nous utilisons ne sont-ils pas tous soumis à des contraintes?

Nombre de techniques sont fondées sur l'utilisation de la dégradation des matériaux. C'est en manipulant des roches cassantes, comme le silex, que l'homme est entré dans la première période technique de l'humanité, l'âge de pierre, il y a environ 2,5 millions d'années. Plus récemment, il y a 5 000 ans, la découverte de substances peu fragiles, comme l'or et le cuivre, a mené l'humanité à l'âge du métal. Les anciens artisans ont utilisé ces métaux malléables pour fabriquer des bijoux et d'autres ornements, car ils pouvaient être facilement étirés ou martelés. En revanche, bien que ces matériaux soient tenaces et capables d'absorber des quantités d'énergie considérables lors de leur déformation, ils ont une courte durée de vie quand on les utilise pour cou-

per ou pour gratter.

Les matériaux des épées ou des gratte-ciel doivent être suffisamment durs pour conserver leur forme sous l'effort, suffisamment résistants

pour ne pas se briser. C'est pourquoi les métaux sont omniprésents dans notre civilisation. Les outils et les armes de pierre sont devenus obsolètes le jour où les métallurgistes ont appris qu'en mélangeant du cuivre et de l'étain, par exemple, ils obtenaient du bronze, plus résistant à la rupture.

Les alliages de carbone et de fer sont plus durs encore que le bronze ; ils sont apparus 1 000 ans avant notre ère, lorsque les métallurgistes inventèrent des fourneaux qui chauffaient suffisamment pour extraire le fer de son minerai. Bien qu'ils soient durs, les alliages de fer et de carbone sont fragiles : ils n'absorbent que peu d'énergie avant de se casser. Plus récemment, les métallurgistes ont appris qu'en soufflant de l'air dans ce mélange on réduit la quantité de carbone, d'où un produit plus ductile : l'acier ! Enfin, les métallurgistes ont appris à créer des matériaux plus ou moins ductiles ou cassants, à volonté.

Le défaut fatal

Bien que ce lien entre technique et comportement des matériaux soit très ancien, la science n'a élucidé les mécanismes de la rupture qu'au cours du XX^e siècle. Même aujourd'hui, de nombreux mécanismes élémentaires de la rupture restent mystérieux. On ne comprend pas, par exemple, pourquoi trois

1. LES BALLE ET LES BATTES ne se cassent pas lorsqu'elles se heurtent, parce qu'elles absorbent l'énergie de la collision. En revanche, une vitre éclate en morceaux quand elle est soumise à un choc. Le comportement des objets soumis à des contraintes dépend des liaisons chimiques entre leurs atomes.

atomes d'hydrogène par million d'atomes de fer suffisent à rendre l'acier dangereusement fragile. Afin de répondre aux questions de ce type, j'utilise la chimie moléculaire et je modélise la rupture des matériaux. J'espérais ini-

tialement concevoir des matériaux qui se briseraient exactement comme prévu : je devais d'abord comprendre la nature de la rupture des liaisons chimiques.

Au début du siècle, les chimistes ont compris que les solides sont des groupes

d'atomes reliés par des liaisons chimiques, et ils ont représenté les liaisons comme des tiges qui joignaient des paires d'atomes. Les solides semblaient être des empilements de polyèdres, tels des cubes ou des octaèdres, dont les



atomes occupaient les sommets et dont les arêtes étaient les liaisons chimiques. Lorsque de telles structures sont soumises à une contrainte, chacune des liaisons se déforme et supporte une partie de la contrainte. Au-delà d'une contrainte critique, les liaisons se rompent et, lorsque trop de liaisons sont rompues, le solide casse.

Rapidement, les physiciens se heurtèrent aux insuffisances de la théorie : les matériaux les plus solides sont endommagés par des contraintes dix fois inférieures à celles qui sont nécessaires pour rompre les liaisons chimiques. Au début des années 1920, A. Griffith montra que la résistance d'un matériau ne résulte pas directement de la solidité de ses liaisons, mais des faiblesses créées par des défauts dans sa structure. Ces défauts, ou fissures, peuvent être microscopiques ou visibles à l'œil nu, selon la manière dont le matériau a été élaboré. Griffith remarqua que, lorsqu'on applique une contrainte qui écarte les bords d'une fissure, les liaisons chimiques situées au fond de la fissure sont plus étirées que les autres. Lorsqu'une de ces liaisons de fond de fissure est étirée au-delà de son point de rupture, les forces se reportent sur les liaisons restantes,

qui se cassent à leur tour : la fissure s'ouvre comme une fermeture éclair, et le solide est brisé (voir la figure 2).

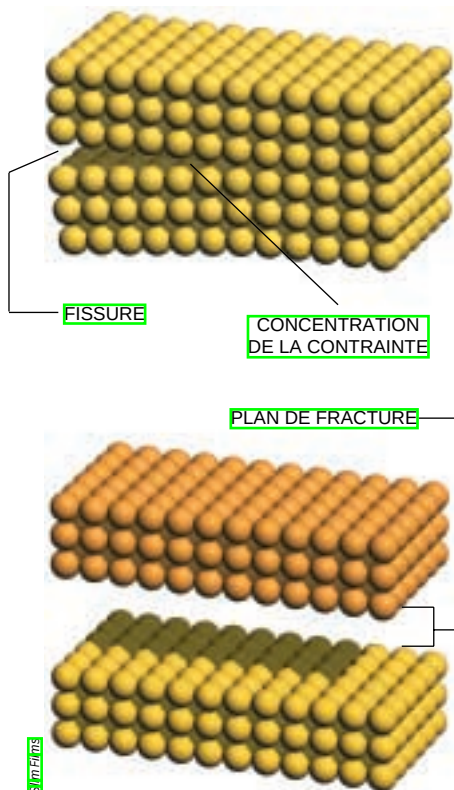
Les artistes et les ingénieurs exploitent cette propriété en dirigeant la formation de fissures aux endroits qui leur conviennent. Ainsi, la force nécessaire pour casser une vitre le long d'une rayure faite au diamant est bien inférieure à celle qu'il faudrait pour fendre une vitre sans défaut.

Au contraire, les matériaux ductiles, tel le cuivre, ne se cassent pas le long d'un défaut superficiel : en 1973, James Rice et Robert Thompson ont supposé que la contrainte qui ouvre une fissure dans un matériau cassant émousse la fissure dans un matériau ductile. Selon leur théorie, les liaisons cassent entre des plans inclinés par rapport au plan des fissures, mais le défaut ne s'aggrave pas, parce que les couches d'atomes glissent les unes par rapport aux autres, réduisant les contraintes. Autrement dit, de nouvelles liaisons se forment à mesure que des liaisons sont rompues (voir la figure 3). L'efficacité de ce mécanisme de glissement dépend de la facilité avec laquelle les liaisons se forment et se rompent le long du plan de glissement atomique.

Ainsi, les matériaux ont des comportements cassants ou ductiles selon la vitesse de rupture des liaisons comparée à celle d'établissement de nouvelles liaisons. Grâce à la microscopie électronique, les métallurgistes déterminent quels plans se sont ouverts et quels plans ont glissé, mais la compréhension fine des différences de comportement demeurait cachée, parce que les liaisons chimiques étaient bien plus complexes que les chimistes ne l'avaient imaginé initialement.

Si la représentation classique de la liaison chimique – une tige reliant des atomes voisins – décrit plusieurs comportements des molécules, elle n'explique pas comment les solides se rompent ou se déforment. Qu'est-ce qu'une liaison chimique ? En imaginant que nous puissions nous tenir debout sur un noyau atomique, nous ne pourrions pas rejoindre le noyau de l'atome voisin en traversant un pont : les liaisons chimiques ne sont pas matérielles, elles résultent de l'agencement des électrons entre les noyaux.

La charge électrique est maximale dans le noyau, car c'est là que les protons, chargés positivement, sont



2. LES MATÉRIAUX FRAGILES se brisent parce que les fissures microscopiques s'agrandissent. Lorsque deux couches d'atomes se séparent au voisinage d'un tel défaut, la contrainte exercée se concentre au fond de la fissure. Dans un matériau comme le verre, les liaisons

chimiques du fond de la fissure cassent en premier, et la fissure s'ouvre comme une fermeture éclair ; les couches d'atomes se séparent le long du plan de la fracture. Quand plusieurs fissures s'ouvrent en même temps, le verre se brise.

rassemblés. Hors du noyau, les électrons engendrent un nuage diffus de charges négatives. Habituellement, c'est dans la direction du noyau le plus proche, là où des électrons qui appartiennent aux deux atomes voisins se recouvrent, que le nuage est le plus dense. En 1926, les physiciens découvrirent les lois de la mécanique quantique, qui décrivent la répartition des charges dans les molécules et dans les atomes, mais la résolution des équations pour un grand nombre d'atomes nécessite des superordinateurs.

À la fin des années 1970, les ordinateurs sont devenus suffisamment puissants pour que l'on étudie sommairement comment la rupture des solides dépend de leur structure électronique. Enfin, en 1990, des ordinateurs ont reproduit le phénomène de cassure ou de déformation des solides.

Grâce à ces machines, des physiciens comme Gregory Olson et Arthur Freeman, du Groupe de recherches métallurgiques de l'Université Northwestern, ont comparé les densités de charge dans des matériaux semblables. D'abord, ils calculèrent les densités de charge dans deux alliages virtuels, l'un où deux plans d'atomes se séparent, et l'autre où ils glissent l'un par rapport

à l'autre. À partir de cette densité de charge, ils déterminèrent la quantité d'énergie nécessaire au déclenchement d'une rupture ou d'un glissement. Puis ils modifièrent la composition des alliages virtuels et relancèrent les calculs. En comparant l'énergie obtenue pour les deux matériaux, ils déterminèrent si les alliages analysés étaient cassants ou ductiles. Les différences d'énergie trouvées entre les alliages virtuels s'accordent avec les propriétés mesurées sur des alliages réels, au laboratoire.

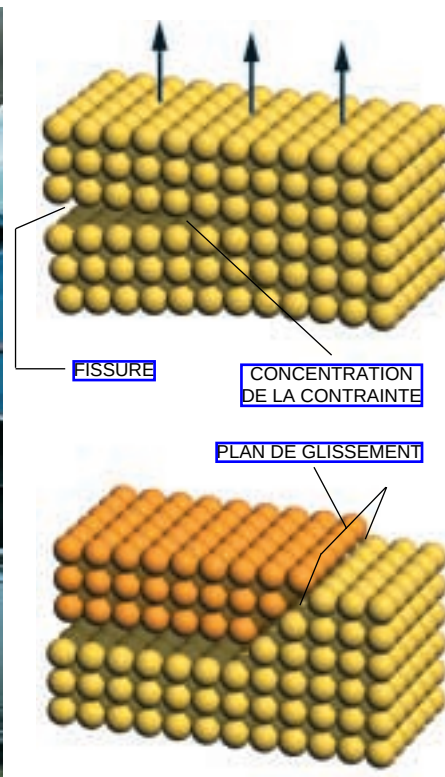
Ces calculs ont montré que l'on savait décrire les ruptures et les glissements, mais ils ne permettaient pas de prévoir comment la modification de la composition d'un alliage engendrait un matériau cassant ou ductile. C'est à ce travail de prédiction que je me suis attelé. En particulier, je voulais comprendre quels éléments on devait ajouter à une structure chimique pour en modifier le comportement mécanique. On sait empiriquement que certains éléments seulement conviennent, mais lesquels? La réponse est apparue quand on a mis au point une nouvelle description des liaisons chimiques dans les solides.

Des liens profonds

Une théorie prédictive de la fragilité serait très utile à ceux qui conçoivent de nouveaux alliages, tel l'aluminium de nickel, un alliage léger qui devient plus résistant quand on le chauffe et que les ingénieurs aéronautiques voudraient utiliser pour les moteurs d'avion. Malheureusement, comme beaucoup d'alliages qui supportent des températures élevées, l'aluminium de nickel est trop cassant pour être utilisé dans la fabrication d'avions et d'autres machines. Rendrait-on l'alliage plus ductile si l'on remplaçait certains atomes de cet alliage?

Les théories classiques décrivent les liaisons chimiques par des densités de charge électronique situées entre les atomes, mais ce concept est simpliste : quand on écarte les atomes, la densité diminue, mais elle ne disparaît jamais. Dans cette hypothèse, les liaisons ne sont jamais rompues, et les ruptures n'ont jamais lieu. Une autre caractéristique de la densité de charge, fondée sur la topologie, représente mieux la nature d'une liaison et la manière dont elle se brise.

La topologie est une branche des mathématiques qui étudie les propriétés qui se conservent par déformation.



3. UN MATÉRIAU DUCTILE se déforme le long de plans inclinés par rapport aux fissures microscopiques initiales. Les atomes de part et d'autre de ce plan glissent les uns par rapport aux autres et diminuent ainsi la contrainte exercée sur les liaisons dans la fissure. Cette

réduction de la contrainte absorbe des quantités d'énergie considérables. C'est pourquoi l'utilisation des métaux ductiles est plus sûre que celle des métaux cassants dans la construction de voitures et d'autres structures résistantes.

En coupant ou en associant des formes, on modifie leur topologie. Une tasse à thé et un anneau, par exemple, sont identiques d'un point de vue topologique : on peut passer de l'un à l'autre par des déformations continues, l'anse de la tasse se transformant en trou. Si l'on utilise un anneau en argile, on peut le façonner en forme de tasse à thé sans couper l'argile. En revanche, on ne peut transformer une boule d'argile en un anneau ou en une tasse à thé sans une perforation qui sépare des parties qui étaient initialement contiguës.

En utilisant ces concepts, le chimiste canadien Richard Bader a analysé les molécules organiques. Ces idées peuvent toutefois être étendues à l'étude des solides métalliques. La cassure change la nature des liens à l'intérieur d'un objet, de sorte que sa description topologique paraît judicieuse. Tout d'abord, comme Bader l'a fait pour les molécules organiques, j'ai dû montrer dans un solide le lien entre la représentation topo-

logique et la représentation classique des liaisons chimiques (voir l'encadré ci-dessous).

On comprend ce qu'est une liaison topologique entre deux atomes quand on compare la densité de charge à une chaîne de montagnes : l'altitude correspond à la densité de charge, les sommets sont les lieux où les charges sont les plus fortes et les cuvettes sont les zones de moindre charge. Deux atomes sont topologiquement reliés quand une ligne de crête relie les sommets. De telles lignes de crête correspondent aux tiges de la représentation classique de la liaison chimique.

Durant quatre ans, j'ai analysé des métaux et des alliages afin de montrer que la représentation topologique des liaisons relie les mêmes atomes que la représentation classique. La topologie enseigne qu'il n'est pas nécessaire d'examiner la totalité de la densité de charge pour établir la carte d'un terrain : seuls sont primordiaux les sommets, les cuvettes et les cols. À partir

de la position de ces points critiques, on interpole le terrain avoisinant. Notamment, quand on connaît la position de deux pics et d'un col qui les relie, on déduit sans risque qu'une ligne de crête – ou une liaison chimique – lie un sommet à l'autre en passant par le col.

La démonstration de la validité de la représentation topologique des liaisons chimiques fut simple, mais elle indiquait seulement quels atomes étaient connectés. Comment savoir si les liaisons se rompraient facilement ou non ? Pour répondre à cette question, il fallait examiner la forme du terrain autour des points critiques. Cette forme peut être caractérisée par les courbures principales en chaque point, des nombres qui décrivent la courbure selon la direction où l'altitude change le plus vite et selon la direction perpendiculaire. Une courbure principale est négative quand elle est analogue à celle d'un sommet ; elle est positive pour une cuvette. Sur un col entre deux sommets, l'altitude

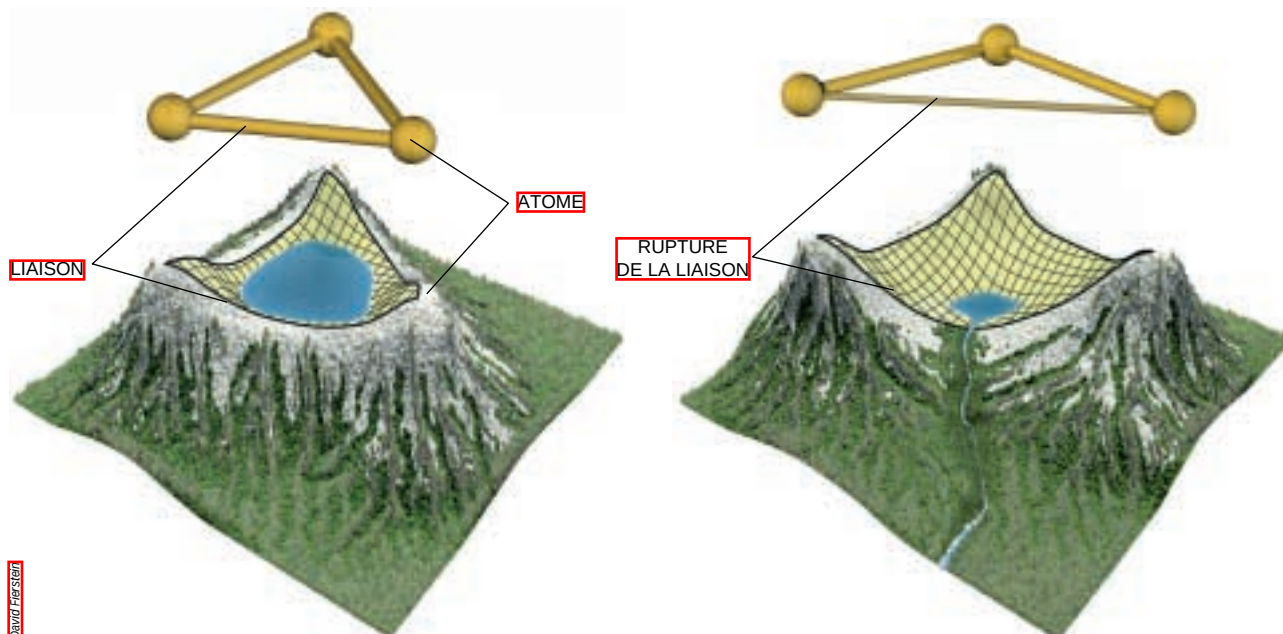
Une nouvelle approche des liaisons chimiques

La théorie classique des liaisons chimiques représente celles-ci comme des tiges entre des atomes. En réalité, les liaisons sont un nuage de charges électroniques. Si l'on sépare deux atomes, le nuage de charges devient moins dense, mais, comme il ne s'annule jamais, on ignore le moment de la rupture. Pour savoir ce qui disparaît lorsque les liaisons se brisent, on examine la topologie de la densité de charge.

La densité de charge, à deux dimensions, est analogue à un paysage de montagne. Les sommets représentent les maxi-

mums de la densité de charge, qui correspondent au noyau des atomes ; la cuvette représente une zone où la charge est très faible, et les arêtes joignant deux sommets représentent les liaisons chimiques.

Lorsqu'un matériau est étiré, les atomes s'éloignent et la densité de charge le long des liaisons diminue. Finalement, les liaisons se cassent – et cessent d'exister en tant que connexion topologique – quand le point le plus bas de la crête passe sous le niveau du fond de la cuvette.



augmente rapidement dans la direction des sommets voisins et décroît dans la direction perpendiculaire. Le col a une courbure principale positive et l'autre courbure principale négative. C'est un point selle.

La description complète de la densité de charge nécessite une description en trois dimensions (au lieu des deux qui correspondent à un paysage). Chaque point critique possède alors trois courbures principales. Un point selle qui a, par exemple, deux courbures principales négatives et une courbure principale positive définit une liaison tridimensionnelle.

Premières prédictions

Comment décrire maintenant la rupture d'une liaison topologique? Lorsque deux atomes à l'intérieur d'un solide s'éloignent, les courbures changent le long de l'axe de la liaison et dans les deux directions perpendiculaires. Quand la courbure s'annule dans une ou deux de ces directions, la connexion topologique entre les atomes disparaît. Dans cette théorie, une liaison est rompue, non pas quand la densité de charge s'annule entre les atomes, ce qui n'arrive jamais, mais quand les deux atomes perdent leur connexion topologique.

Grâce à cette description, on obtient une analyse quantitative de la fracture. Reprenons l'analogie du paysage, à deux dimensions, et considérons un point selle (voir l'encadré de la page 72). En partant d'un col entre deux sommets, on peut se diriger dans quatre directions différentes à altitude constante (deux autour de chacun des sommets adjacents). En suivant ces chemins, la densité de charge n'est donc pas modifiée. Si quatre personnes se mettent en marche à partir du col, chacune dans l'une de ces quatre directions, elles décriront un X dans un plan qui fera un angle aigu avec la pente escarpée qui descend vers le lac ou la cuvette qui représente la zone de densité de charge minimale. On calcule que cet angle est lié au quotient des deux courbures principales du col.

Étirer une liaison interrompue, c'est réduire la densité de charge entre les noyaux. C'est aussi comme si l'on éloignait deux sommets tout en abaissant le col, par déblai de roches. La valeur de l'angle initial, avant la séparation, indique combien de rochers

peuvent être enlevés, et, à mesure que l'on creuse, l'angle diminue. Lorsque cet angle approche de zéro, l'altitude du col devient inférieure à celle de la surface du lac et celui-ci commence à se vider. Quand l'angle est égal à zéro, le col n'existe plus (la liaison se rompt). À cet instant, le col est au même niveau que le point le plus bas de la cuvette, et la dernière goutte d'eau du lac disparaît.

Inversement, une liaison se forme par l'ajout de charges. Topologiquement, la création d'une liaison correspond au remblai de matériaux rocheux pour former une digue ou une ligne de crête à partir du centre du lac. En bref, une liaison se brise quand on retire de la charge de la zone qui entoure le point selle, et une liaison peut se former quand on ajoute de la charge auprès d'un minimum.

Quand on considère des densités de charge dans l'espace à trois dimensions, les angles qui les mesurent doivent être remplacés par des formes géométriques. Au lieu d'un plan contenant les quatre directions où l'on peut se déplacer à altitude constante, on doit utiliser une forme qui contient toutes les directions où la densité de charge est équivalente.

Si l'on prend la forme en X des directions bidimensionnelles de densités de charge égales et qu'on la fasse tourner autour de son axe le long de la liaison chimique, on obtient deux cônes opposés par le sommet. Les cônes font un angle aigu avec un plan perpendiculaire à la liaison et passant par le sommet des cônes. C'est cet angle qui mesure la quantité de charges qui doit disparaître au point selle pour qu'une liaison se brise. Lorsque l'angle diminue, les bases des cônes se rapprochent et forment finalement un disque. Comme pour le paysage bidimensionnel, plus l'angle initial est grand, plus grande est la charge qui doit être ôtée pour arriver à un angle nul et rompre la liaison.

L'inverse d'une rupture de liaison est la formation d'une liaison, dont la compréhension est également nécessaire à la description du phénomène de rupture. De même qu'un cône représente une liaison, d'autres formes géométriques représentent les autres points critiques. Les minimums qui peuvent devenir des liaisons quand on leur ajoute suffisamment de charges, sont représentés par des ellipsoïdes. Dans

ce cas, deux angles sont nécessaires à la caractérisation géométrique et à la mesure de la quantité de charges qui doit être transportée du point selle pour former la liaison. Ces angles indiquent également dans quelle direction il sera le plus facile de construire une digue qui traverse le lac.

Avec cette représentation géométrique pour tous les points critiques

d'un solide, on peut mesurer exactement quand et de combien la densité de charge se modifie pendant la formation et la destruction d'une liaison. Le comportement cassant ou ductile d'un matériau dépend de la prépondérance de ces deux mécanismes, formation et destruction d'une liaison. Ainsi, en favorisant un mécanisme par rapport à l'autre, nous pour-

rons modifier le comportement des matériaux.

Appliquons ce raisonnement à la description des propriétés de l'aluminium de nickel et de deux alliages très proches, les aluminures de fer et de cobalt.

Ces trois composés aux structures identiques sont idéaux pour tester une nouvelle description de la rupture des

Fâcheuses cassures

La défaillance subite d'une structure qui met en jeu la sécurité doit évidemment être évitée à tout prix. Les passagers et l'équipage du vol 243 d'*Aloha Airlines* ont fait les frais d'une telle défaillance, le 28 avril 1988. Vingt minutes après le départ, des fissures le long des rivets de l'enveloppe métallique de l'avion se sont brusquement ouvertes. Une surpression dans la cabine emporta six mètres de fuselage avant, et l'avion dut atterrir en urgence. Un passager fut éjecté en vol ; ce fut la seule victime.

Des contrôles plus minutieux de l'avion, avant l'accident, auraient révélé que des fissures microscopiques autour des rivets avaient grandi, au cours de 19 années de service. Pendant le fatiguage et dernier vol de cet avion, les fissures ont atteint une taille critique et se sont ouvertes.

Jusqu'à ce moment, le métal avait travaillé doucement, uniquement à l'endroit des fissures, comme les ingénieurs l'avaient souhaité. Cette déformation ductile diminue les contraintes en émoussant les extrémités des fissures. Leur lente croissance est le meilleur moyen de noter des signes de fatigue avant une brusque rupture.

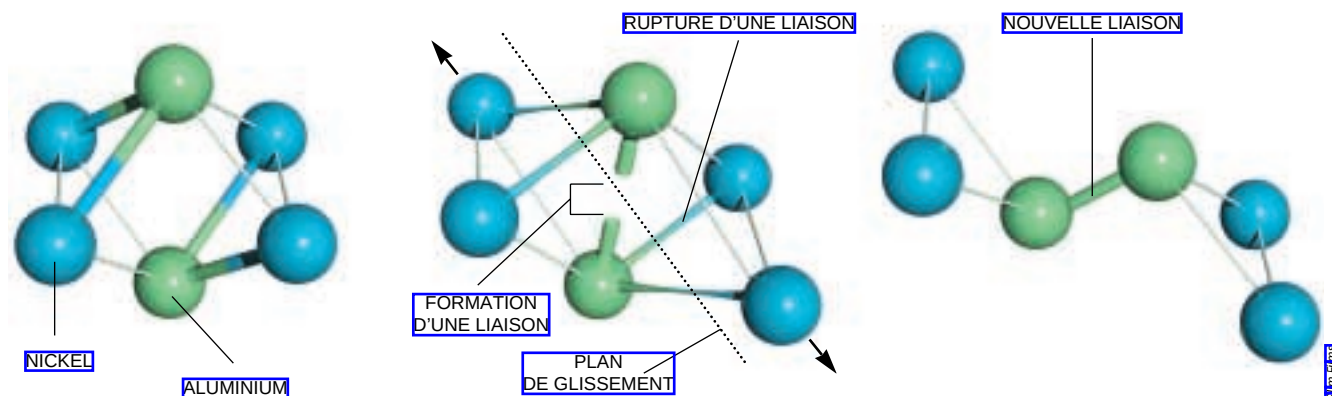
Par souci de sécurité, les constructeurs de matériaux cherchent à ajouter un zeste de ductilité aux métaux rigides utilisés dans les avions. Pour rendre un matériau plus ductile, on lui ajoute un élément chimique, mais lequel ? Pendant des siècles, la recherche de cet élément s'est effectuée par tâtonnements, mais aujourd'hui, on prédit quels seront les éléments les mieux adaptés.

Les métallurgistes ont un autre moyen de prévenir la rupture d'un matériau cassant : le contrôle de la structure microscopique. Les chimistes des matériaux peuvent disposer individuellement chaque cristal métallique avec le même soin que pour l'emballage de la porcelaine. Par exemple, ils enveloppent les cristaux d'un matériau cassant dans des couches d'un matériau ductile, tel le cuivre : toute fêlure se produisant dans le cristal d'un métal cassant ne dépassera pas la couche ductile. Une fois que le meilleur alliage de base est choisi, on le rend suffisamment ductile, grâce à cette structure en sandwich, pour qu'il soit sans danger ou tout au moins pour qu'il présente des signes de fatigue avant la catastrophe.



L'ÉVACUATION DES PASSAGERS du vol 243 de l'*Aloha Airlines*.

CRISTAL D'ALUMINIURE DE NICKEL



4. LA TOPOLOGIE DE DENSITE DE CHARGE révèle où et quand les liaisons chimiques se brisent et se forment lorsqu'un solide métallique se déforme. Les théories classiques n'expliquent pas ces phénomènes : par exemple, elles n'indiquent pas si une liaison se forme entre deux atomes d'aluminium, dans un cristal d'aluminium de nickel

quel quand celui-ci est étiré le long d'un plan de glissement. La charge nécessaire à la formation de cette liaison provient de la rupture des liaisons entre les atomes d'aluminium et de nickel. La manipulation de ce transfert de charge est la clé de la fabrication d'alliages plus ductiles.

matériaux. J'ai cherché les différences de propriétés entre ces trois alliages qui n'avaient pas été expliquées par les modèles classiques, et quels éléments ajoutés à l'aluminium de nickel le rendraient plus ductile. L'aluminium de nickel est ductile si les liaisons initiales sont maintenues longtemps avant la rupture, tandis que de nouvelles liaisons se forment rapidement le long du plan de glissement. Pour satisfaire ces exigences contradictoires, il fallait utiliser la charge des liaisons qui se rompent pour en former de nouvelles. Afin d'évaluer dans quelle mesure ce projet était faisable, j'avais besoin de nouveaux programmes informatiques qui engendreraient les nombres représentant la densité de charge et qui évalueraient les changements dans sa topologie.

À l'Université de Tulane, James MacLaren avait mis au point les instruments dont j'avais besoin pour calculer la densité de charge des trois alliages, et pour identifier les points critiques et les différents angles qui les décrivent. Les premières simulations ont confirmé l'accord avec les propriétés expérimentales. Par exemple, l'aluminium de fer, connu pour être le plus ductile des trois alliages, est celui qui a la charge la plus forte autour du point selle, dans les liaisons entre les atomes de fer et d'aluminium. Cet alliage a aussi un minimum très plat entre les atomes d'aluminium voisins, et, par conséquent, la création d'une liaison à cet endroit ne nécessiterait qu'une faible charge.

J'ai poussé cette idée plus loin. Les programmes ont calculé la modification

des propriétés de l'aluminium de nickel en remplaçant quelques atomes de nickel par un élément qui placerait davantage de charges le long de la liaison nickel-aluminium, charges qui seraient ensuite disponibles pour la création de nouvelles liaisons entre les atomes d'aluminium à l'endroit du minimum. Cette redistribution des charges rendrait le matériau plus ductile.

Par quels éléments remplacer le nickel? L'analogie avec la chaîne de montagnes montre que chaque atome est un sommet, avec des pentes différentes qui en descendent. Dans une montagne d'aluminium proche d'une montagne de fer, il y a davantage de rochers à l'endroit du col, et la cuvette est plus plate qu'à côté d'une montagne de nickel. Avec du fer, il y a suffisamment de rochers pour retirer une partie de la liaison et pour la construction d'une nouvelle ligne de crête entre les atomes d'aluminium dans la cuvette. En revanche, avec une montagne de cobalt, il n'y a pas assez de rochers à l'emplacement du col pour la construction d'une ligne de crête. Le fer semblait le meilleur candidat pour la substitution.

Lorsque ce résultat fut obtenu, la recherche empirique d'éléments capables d'améliorer l'aluminium de nickel était en cours depuis 15 ans, de sorte que j'espérais qu'elle aurait confirmé mes prévisions. De fait, à une conférence, à la fin de 1998, j'ai appris que dix pour cent de fer substitué au nickel donne exactement l'effet prévu.

Trop tardive pour améliorer les alliages d'aluminium de nickel, la théorie topologique de la liaison chimique

devrait mettre fin aux longs tâtonnements des métallurgistes.

On l'utilise déjà pour chercher de nouveaux alliages plus légers, plus solides et qui conservent leurs propriétés à des températures supérieures. Ces alliages seront utilisés pour la fabrication d'avions supersoniques dans les années 2010. Enfin, au lieu de tester d'innombrables alliages que l'on modifie à l'aveuglette, les métallurgistes utiliseront des ordinateurs pour calculer la densité de charge d'alliages qu'ils n'auront pas à réaliser. Munis de cette information, ils détermineront comment modifier la densité de charge pour obtenir les propriétés désirées et ainsi prévoir quels éléments produiront ces changements. Et si l'on brise une bouteille de champagne sur le nez d'un avion construit avec ces alliages, j'espère être là pour en étudier la rupture.

Mark EBERHART est professeur de chimie et de géochimie à l'École des mines du Colorado.

Richard F.W. BADER, *Atoms in Molecules : A Quantum Theory*, Oxford University Press, 1994.

Mark EBERHART, *Computational Metallurgy*, in *Science*, vol. 265, pp. 332-333, 15 juillet 1994.

Ivan AMATO, *Stuff*, BasicBooks, 1997.

M.E. EBERHART et A.F. GIAMEI, *The Visualization and Use of Electronic Structure for Metallurgical Applications*, in *Materials Science and Engineering A : Structural Materials*, vol. 248, n° 1, pp. 287-295, 1998.

Les archives climatiques des lacs du Jura

MICHEL MAGNY

Les sédiments accumulés dans les lacs du Jura, les glaces du Groenland et les sédiments de l'Atlantique Nord, révèlent les fluctuations du climat depuis 10 000 ans. Paradoxalement, un brusque réchauffement peut amener un refroidissement de la planète.

L'étude des climats du passé repose sur la nature et la datation des sédiments anciens en divers points du globe terrestre. Après avoir longtemps divergé, les données marines et continentales s'accordent aujourd'hui pour reconnaître la relative instabilité du climat au cours des douze derniers millénaires. Certaines des oscillations climatiques qui ont été ainsi identifiées présentent un intérêt tout particulier : remarquables par leur amplitude et leur rapidité, elles pourraient préfigurer le proche avenir de notre climat menacé par la pollution de l'atmosphère.

L'examen des sédiments déposés au fond des mers a établi que le climat, lors de la période quaternaire (recouvrant

les deux derniers millions d'années), a été marqué par une alternance de phases froides, ou glaciations, et de phases de réchauffement, ou interglaciaries.

Pendant les glaciations, les continents sont partiellement envahis par des calottes glaciaires qui se développent à partir des zones polaires et des montagnes. Le stockage des eaux sous forme de glaces sur les continents a pour conséquence un abaissement du niveau des océans. Ainsi, lors du dernier maximum glaciaire, il y a quelque 20 000 ans, d'énormes calottes de glace ont recouvert l'Amérique du Nord jusqu'au Sud des Grands Lacs, et l'Europe du Nord jusqu'au Sud de Belfast et de la Baltique ; parallèlement, le niveau des

océans a baissé de 120 mètres. Pendant les périodes interglaciaires, le climat se réchauffe, et la Terre retrouve une physionomie voisine de celle qui prévaut actuellement.

Ces grands changements climatiques résultent des variations périodiques de l'orbite de la Terre, qui modifient la quantité de chaleur solaire absorbée par la Terre. Ainsi, les glaciations se répètent tous les 100 000 ans environ depuis près d'un million d'années. Toutefois certaines variations du climat sont beaucoup plus rapides.

Dix degrés en 20 ans !

L'analyse de deux sondages réalisés par des équipes européennes (Projet GRIP) et américaines (Projet GISP2) sur le site de Summit, au Groenland, a donné de nouvelles courbes retraçant dans le détail l'histoire du climat depuis 130 000 ans, c'est-à-dire depuis le dernier interglaciaire (ou Éémien). Ces courbes s'appuient, en particulier, sur l'évolution du rapport des deux isotopes 18 et 16 de l'oxygène contenu dans la glace (une diminution de la concentration en oxygène 18 traduit un refroidissement du climat).

1. VUE AÉRIENNE DU PETIT LAC D'ÉTIVAL, dans le Jura (à gauche). Avec plus de 80 plans d'eau, souvent d'origine glaciaire, le Jura offre aux paléoclimatologues un champ d'investigation exceptionnel. Ils extraient des carottes où les sédiments enregistrent les variations passées du climat qui ont affecté l'alimentation des lacs et provoqué des variations de leur niveau. La carotte de 50 centimètres de longueur a été prélevée dans les sédiments du lac de Narlay, dans le Jura, documente une forte baisse du niveau du lac survenue vers 2500 avant notre ère. Comme les autres glaciers alpins, le glacier d'Aletsch (à droite), dans les Alpes suisses, se révèle très sensible aux variations du climat, même de faible ampleur. Sa masse s'est ainsi considérablement amoindrie depuis la fin du Petit Âge Glaciaire, vers 1850. La comparaison des oscillations du climat retracées récemment dans le Jura avec celles obtenues au début des années 1970 par les palynologues et les glaciologues dans les Alpes suisses et autrichiennes montre que les hausses des lacs du Jura coïncident pendant les dix derniers millénaires avec les avancées des glaciers dans les Alpes (un refroidissement du climat se traduisant dans les deux régions par de plus fortes précipitations).



À la surprise générale, la courbe du sondage GRIP démontre l'extrême instabilité du climat durant l'Éémien, avec notamment un épisode où le refroidissement est de 14 °C en une vingtaine d'années. Si la réalité de cet épisode est encore controversée, les sondages GRIP et GISP2 confirment tous deux la très forte instabilité du climat tout au long de la dernière glaciation, entre -80 000 et -10 000 ans. Ces fluctuations (connues désormais sous le nom d'événements de Dansgaard-Oeschger) présentent la même succession typique : au départ, un brusque réchauffement survenant en quelques dizaines d'années, suivi par un retour progressif (en 2 000 à 3 000 ans) à des conditions glaciaires qui perdurent ensuite pendant environ un millénaire. Ces événements apparaissent eux-mêmes regroupés dans des sortes de cycles, dits «cycles de Bond», caractérisés chacun par une succession de refroidissements de plus en plus intenses.

Ces variations climatiques ont été aussi repérées sur les carottes de sédiments marins : les pics de froid achevant les cycles de Bond coïncident avec des débâcles massives d'icebergs dans

l'Atlantique Nord. Ces débâcles sont marquées par la présence, dans les sédiments marins, de couches de débris de roches provenant du Canada et du Groenland.

Une stabilité trompeuse

Contrastant avec une forte instabilité pendant l'Éémien et la dernière glaciation, l'histoire du climat pendant notre interglaciaire (dénommé aussi Holocène, la dernière partie du Quaternaire, ayant duré environ 12 000 ans) apparaissait beaucoup plus stable aux paléoclimatologues travaillant sur les carottes marines ou glaciaires. La courbe isotopique du sondage GRIP, par exemple, suggérait une étonnante uniformité de la température tout au long des 11 500 dernières années, excepté deux brefs épisodes de refroidissement plus marqués, le premier il y a 11 200 ans et le second il y a 8 200 ans ; ces deux épisodes d'environ deux siècles sont connus sous les noms d'oscillation préboréale et d'événement 8200.

Dans cette stabilité générale, un refroidissement récent faisait exception : connu sous le nom de Petit Âge

Glaciaire, il se traduisit, entre 1500 et 1850, par une avancée des langues glaciaires dans les Alpes en Europe et, d'une façon générale, dans les montagnes de tous les continents.

Cette relative stabilité du climat de notre interglaciaire contrastait avec les résultats obtenus depuis 25 ans en milieu continental. Ainsi, par exemple, dès le début des années 1970, palynologues et glaciologues, en Suisse et en Autriche, montraient que toute la durée de l'Holocène était ponctuée par une alternance d'avancées et de retraits des langues glaciaires. L'amplitude de ces différentes avancées n'était certes pas comparable avec celle atteinte lors des grandes glaciations. Toutefois, la succession de ces avancées et de ces retraits, en plein Holocène, suggérait que le Petit Âge Glaciaire n'était que l'épisode le plus récent d'une série de refroidissements qui avaient affecté tout notre interglaciaire. Des résultats similaires obtenus en Scandinavie par W. Karlén, de l'Université de Stockholm et, en Alaska, par G.H. Denton, de l'Université du Maine, amenaient ces deux chercheurs à reconnaître au cours de l'Holocène l'existence de cycles climatiques d'environ 2 500 ans.

L'apport des sédiments lacustres

Les lacs occupent souvent des dépressions creusées, puis abandonnées par les glaciers lors de la dernière glaciation, comme en Scandinavie ou encore dans la zone péréalpine et dans le Jura ; les recherches paléoclimatiques en milieu continental s'appuient aussi sur l'analyse des sédiments qui s'y déposent.

Les archives climatiques contenues dans ces cuvettes lacustres ne permettent pas de remonter aussi loin dans le temps que les carottes glaciaires et marines : les sédiments accumulés au fond des lacs du Jura ne documentent qu'une période d'environ 20 000 ans contre 450 000 ans pour les glaces polaires, ou plusieurs millions d'années pour les dépôts marins. Toutefois, les lacs présentent un intérêt majeur pour la reconstitution des climats du passé : la vitesse moyenne d'accumulation annuelle de sédiments y est particulièrement importante (un à deux mètres de dépôts par millénaire). Grâce à cette haute résolution chronologique, les géologues peuvent reconstituer dans le détail les oscillations du climat survenues depuis la dernière glaciation.

Outre l'analyse de la composition isotopique des dépôts et l'étude des

pollens fossiles qui documentent l'histoire de la végétation, les carottes extraites des remplissages lacustres témoignent des fluctuations passées du niveau de l'eau dans ces cuvettes. Les oscillations du climat ont en effet déterminé des changements dans l'alimentation et dans le bilan hydrique de ces lacs, entraînant des variations de leur niveau. Ces variations sont enregistrées par des changements dans les types de sédiments accumulés au bord des lacs (alternance de couches de tourbes, de craie lacustre, d'oncolithes...)

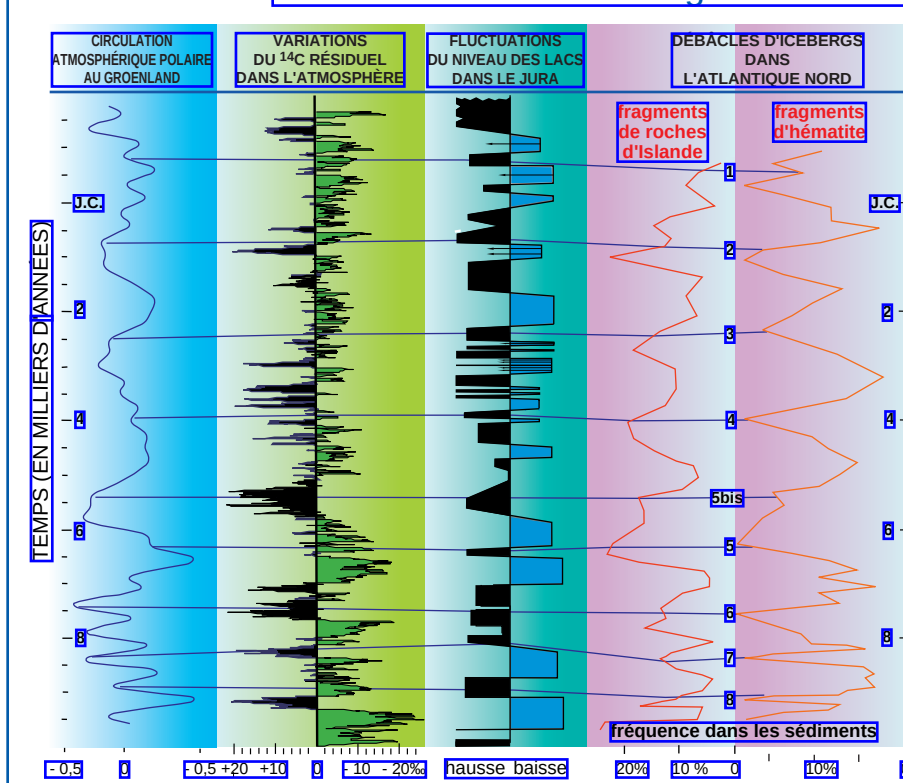
Depuis 15 ans, une équipe du Laboratoire de chrono-écologie, à Besançon, travaille à la reconstitution des fluctuations passées des niveaux lacustres dans le Jura et la zone péréalpine. L'étude des remplissages sédimentaires de plus de vingt cuvettes retrace l'histoire de ces plans d'eau depuis les débuts de l'Holocène. La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus par les palynologues et les glaciologues suisses et autrichiens, révèle que les périodes de hausse des plans d'eau dans le Jura coïncident avec les phases de refroidissement, lesquelles sont marquées dans les Alpes par une avancée des glaciers et un abaissement de la limite forestière.

Ainsi, même au cours de cet interglaciaire, le climat est loin d'être parfaitement stable. Refroidissements et réchauffements alternent tout au long de l'Holocène, et le Petit Âge Glaciaire n'est pas exceptionnel. En se fondant sur l'amplitude des mouvements en altitude de la limite forestière dans les Alpes, les chercheurs suisses et autrichiens estiment que ces mouvements reflètent des variations des températures moyennes estivales de l'ordre de 1,5 °C à 2 °C.

Stabilité ou instabilité ?

Une certaine discordance apparaissait donc dans l'évaluation du climat de notre interglaciaire entre les chercheurs travaillant sur les continents et ceux qui analysaient les sédiments marins et les glaces polaires : les premiers identifiaient de multiples oscillations pendant l'Holocène, tandis que les seconds mettaient en avant la monotonie des courbes isotopiques pour cette période. En outre, la faible épaisseur de la période holocène dans les carottes marines où, souvent, les sédiments récents sont perturbés lors des opérations de prélèvement, n'incitait pas à des investigations très approfondies. Le géochimiste français J.-C. Duplessy notait néanmoins,

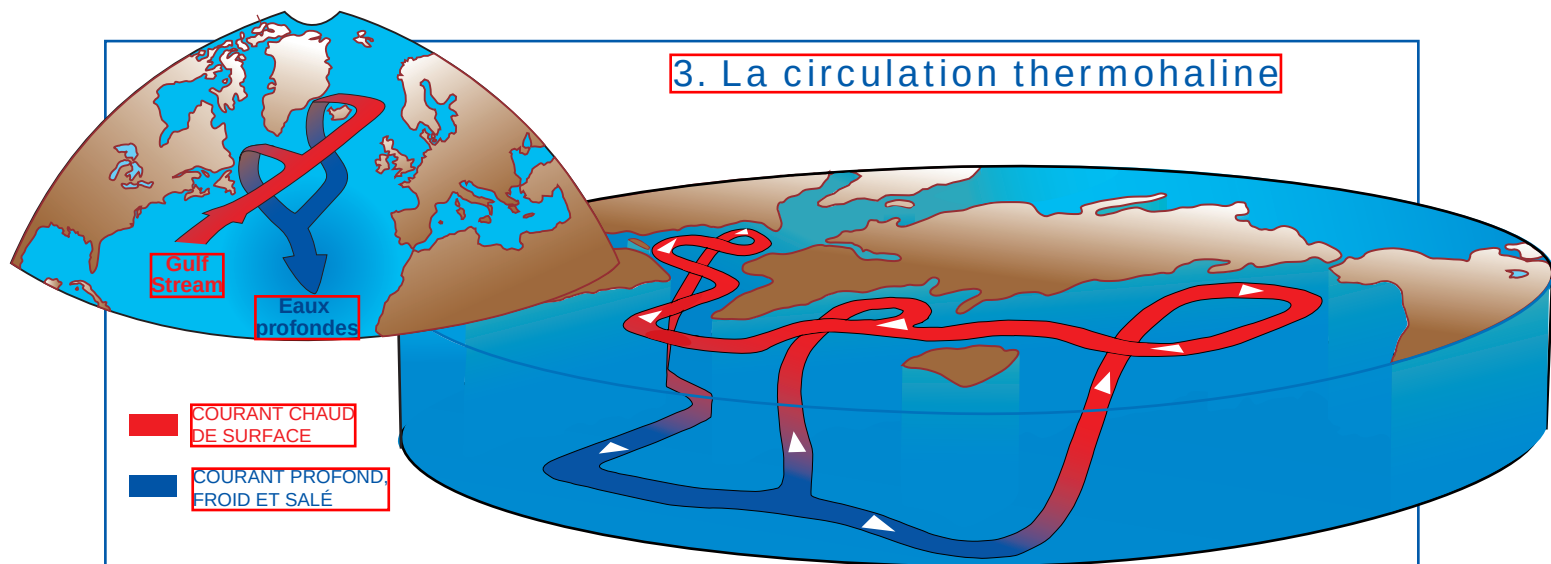
2. Mesures des changements de climat



Les renforcements de la circulation atmosphérique polaire et les débâcles d'icebergs dans l'Atlantique Nord coïncident avec des refroidissements du climat marqués par la hausse des lacs dans le Jura. L'intensité de la circulation atmosphérique polaire est reconstituée à partir de la composition chimique des poussières retrouvées dans les glaces du Groenland, et les débâcles d'icebergs par la concentration en fragments de roches originaires d'Islande, du Groenland et des îles du Spitzberg.

L'ensemble de notre interglaciaire est ponctué par des oscillations du climat où se combinent des périodicités de 2 300 et 1 470 ans. Les corrélations qui apparaissent entre les accidents climatiques et les variations du carbone 14 résiduel

3. La circulation thermohaline



L'océan est un rouage essentiel de la machine climatique. Couvrant plus des trois quarts de la planète, il assure environ 50 pour cent du transfert d'énergie des zones excédentaires des tropiques vers les zones déficitaires des pôles. Le Gulf Stream constitue le terme de la circulation thermohaline qui anime l'ensemble des océans du Globe. Les eaux de surface de l'Atlantique Nord plongent sur deux sites principaux, le premier au large du Labrador, et le second en mer de Norvège. Elles s'écoulent ensuite en profondeur jusqu'à vers le Pacifique Nord, où elles refont surface. De là, par un courant chaud de surface, elles rejoignent l'Atlantique Nord. La pompe de ce mouvement est dans la zone du cercle polaire arctique : les eaux polaires sont plus denses en raison de la basse température et du sel que rejette la glace lors de sa formation. En outre, la salinité de l'Atlantique Nord est plus forte que celle du Pacifique.

Ce gigantesque «tapis roulant» océanique fonctionne au profit de l'Europe : le Gulf Stream draine un flux d'eau chaude de 20 millions de mètres cubes par seconde qui, en se refroidissant vers le Nord, libère une forte quantité de chaleur dans l'atmosphère.

Une partie du carbone 14 contenu dans l'atmosphère se mêle aux eaux superficielles de l'océan. Il est entraîné ensuite au fond de l'océan par les eaux qui plongent en mer de Norvège. Dans les abysses, le carbone 14 se désintègre alors en azote 14, et les eaux profondes s'appauvrissent peu à peu en carbone 14. Ainsi, lorsque la circulation thermohaline se renforce, elle accélère le retour en surface, dans le Pacifique, d'un plus grand volume d'eaux profondes déficitaires en carbone 14, ce qui, à terme, affaiblit la concentration atmosphérique en radiocarbone. Et inversement, dans l'hypothèse d'un ralentissement de la circulation océanique.

en 1996, des corrélations possibles entre des phases de faible salinité dans l'Atlantique et des périodes d'assèchement sous les Tropiques.

La situation a rapidement évolué au cours des quatre dernières années. Fin 1995, S. R. O'Brien, de l'Université de Durham, révèle que la concentration en sels marins et la composition chimique des poussières contenues dans le sondage GISP2 du Groenland témoignent des variations du climat pendant l'Holocène. Un second article, publié en 1997, attire l'attention de la communauté des paléoclimatologues sur l'événement 8200 enregistré dans les glaces du Groenland : R. B. Alley et ses collègues de l'Université de Pennsylvanie ne trouvent aucune explication satisfaisante à cet épisode, mais ils soulignent l'amplitude du refroidissement auquel il correspond – vraisemblablement 6 °C au Groenland et près de 2 °C en Europe de l'Ouest.

À la fin de l'année 1997, P. Mayewski et ses collègues de l'Université de Durham approfondissent l'étude de la composition chimique des poussières

contenues dans les glaces du Groenland. Cette composition, qui reflète l'intensité et l'extension de la circulation atmosphérique polaire, montre des variations sensibles tout au long de l'Holocène. La courbe de ces variations révèle des périodicités de 1 450 ans et 2 300 ans, que l'on retrouve dans la courbe du carbone 14 résiduel (voir l'encadré 4). Parallèlement, encouragée par les résultats qu'avait obtenus l'équipe de S. R. O'Brien, une autre équipe, réunie autour de G. Bond, de l'Université de Columbia, entreprend d'étudier en détail deux carottes prélevées dans l'Atlantique Nord, la première au large de l'Irlande et la seconde entre les côtes groenlandaises et islandaises. Pour pallier le faible taux de sédimentation, les échantillons analysés sont prélevés à des intervalles de l'ordre du centimètre ou du demi-centimètre ! Les débris de roches retrouvés dans ces échantillons révèlent l'existence de plusieurs débâcles d'icebergs qui proviennent du Groenland et du Spitzberg et ponctuent l'ensemble de l'Holocène avec une périodicité d'environ 1 470 ans.

Ces débâcles montrent en outre l'invasion d'eaux froides originaires des zones au Nord de l'Islande jusqu'à la latitude de la Grande-Bretagne !

Un consensus se dégage aujourd'hui : sans atteindre bien sûr l'amplitude qu'ils possédaient en période glaciaire, des accidents climatiques ponctuent toute la durée de l'Holocène. Les périodes de circulation atmosphérique polaire forte et intense et les débâcles d'icebergs coïncident avec les phases de refroidissement climatique marquées, dans le Jura, par une hausse des plans d'eau et, dans les Alpes, par une avancée des langues glaciaires. L'histoire du climat de nos régions, au cœur de l'Europe tempérée, apparaît ainsi étroitement déterminée par la dynamique d'un système où interagissent l'océan Atlantique Nord, la calotte glaciaire groenlandaise et la circulation atmosphérique polaire. En outre, le parallélisme entre les variations du carbone 14 résiduel dans l'atmosphère et les accidents climatiques identifiés dans le Jura, dans l'Atlantique et au Groenland, suggère de rap-

porter ces oscillations du climat à des variations périodiques de l'activité du Soleil, dont les effets ont été amplifiés par des changements de la circulation océanique.

La circulation thermohaline et les réchauffements

En examinant les variations du carbone 14 résiduel atmosphérique depuis 14 500 ans, on distingue deux périodes : la première, qui couvre le Tardiglaciaire et les débuts de l'Holocène jusque vers 5000 avant J.-C., est caractérisée par de larges variations des valeurs du carbone 14, dont l'amplitude s'atténue peu à peu ; la seconde partie de notre interglaciaire montre des variations d'une amplitude plus faible et plus régulière. Au cours de la période antérieure à 5 000 avant J.-C., on remarque en outre la succession de trois cycles asymétriques (voir l'encadré 4) qui présentent la même structure interne : une brusque chute des valeurs du carbone 14, bientôt suivie par leur remontée progressive ponctuée par de brefs maximums, et enfin une période de maximum qui se prolonge sur près d'un millénaire.

Traduit en termes de circulation océanique, le début de ces cycles correspondrait à une brusque réactivation de la circulation thermohaline (voir l'encadré 3), suivie, dans un premier temps, par son ralentissement progressif (ponctué par de brefs épisodes de fort ralentissement) et, enfin, par une période prolongée de plus faible circulation thermohaline. Traduit en termes climatiques, on note qu'effectivement les phases de renforcement de la circulation thermohaline coïncident bien avec des périodes de réchauffement dans le Jura et au Groenland, ou encore avec l'absence de débâcles d'icebergs dans l'Atlantique Nord.

La structure de ces trois cycles du radiocarbone résiduel qui se succèdent pendant le Tardiglaciaire et la première partie de l'Holocène n'est pas sans rappeler le schéma d'évolution caractéristique des événements de Dansgaard-Oeschger évoqués précédemment. Elle s'apparente également à la courbe des fluctuations du rapport oxygène 18/oxygène 16 obtenue dans le sondage GISP2 pour la période comprise entre 12500 et 9500 environ avant notre ère. Cette période tardiglaciaire, immédiatement antérieure à l'Holocène, correspond à la

première phase de réchauffement sensible qui suit la fin de la dernière glaciation. Un brusque réchauffement survient aux environs de 12500 avant notre ère : le rapport oxygène 18/oxygène 16 atteint d'emblée des valeurs voisines de celles qui seront les siennes tout au long de l'Holocène. Mais bientôt ces valeurs déclinent, marquant un refroidissement progressif du climat ponctué de plusieurs coups de froid, dont le premier est connu sous le nom de Dryas moyen. La période s'achève par une phase froide prolongée, le Dryas récent, pendant laquelle le climat retrouve une rigueur proche de celle des temps glaciaires. Cette période de 12500 à 9500 avant notre ère présente toutes les caractéristiques d'un faux départ de notre interglaciaire.

Paradoxalement, le retour aux conditions glaciaires pendant le Dryas récent survient alors que la Terre bénéficie d'un maximum d'insolation, celui qui précisément a déclenché la déglaciation. Les carottes extraites de l'Atlantique ont établi que le Dryas récent et les coups de froid qui le précèdent et le suivent immédiatement, c'est-à-dire le Dryas moyen et l'oscillation préboréale, coïncident avec des ralentissements de la circulation thermohaline : la haute résolution chronologique d'une carotte extraite en mer de Norvège suggère même que ces ralentissements de la circulation thermohaline sont survenus en moins d'un demi-siècle.

Les paléoclimatologues qui ont travaillé à retracer l'histoire de la déglaciation de la fin de la dernière glaciation aux débuts de notre interglaciaire ont établi le synchronisme qui a existé entre les deux importants réchauffements du climat qui surviennent aux environs de 12500 et 9500 avant J.-C., et deux périodes de fonte très rapide des calottes glaciaires. Cette fonte provoque alors une brusque remontée du niveau général des océans, pouvant atteindre un rythme de quatre centimètres par an ! Dans les deux cas, le brusque afflux d'eau douce qui en a résulté dans la zone de l'Atlantique Nord aurait modifié la densité des eaux marines, perturbé la formation des eaux profondes et ralenti la circulation thermohaline (voir l'encadré 3). Les coups de froid du Dryas moyen et de l'oscillation préboréale seraient les contrecoups directs de ces épisodes de fonte accélérée et de ces brusques afflux d'eau douce dans

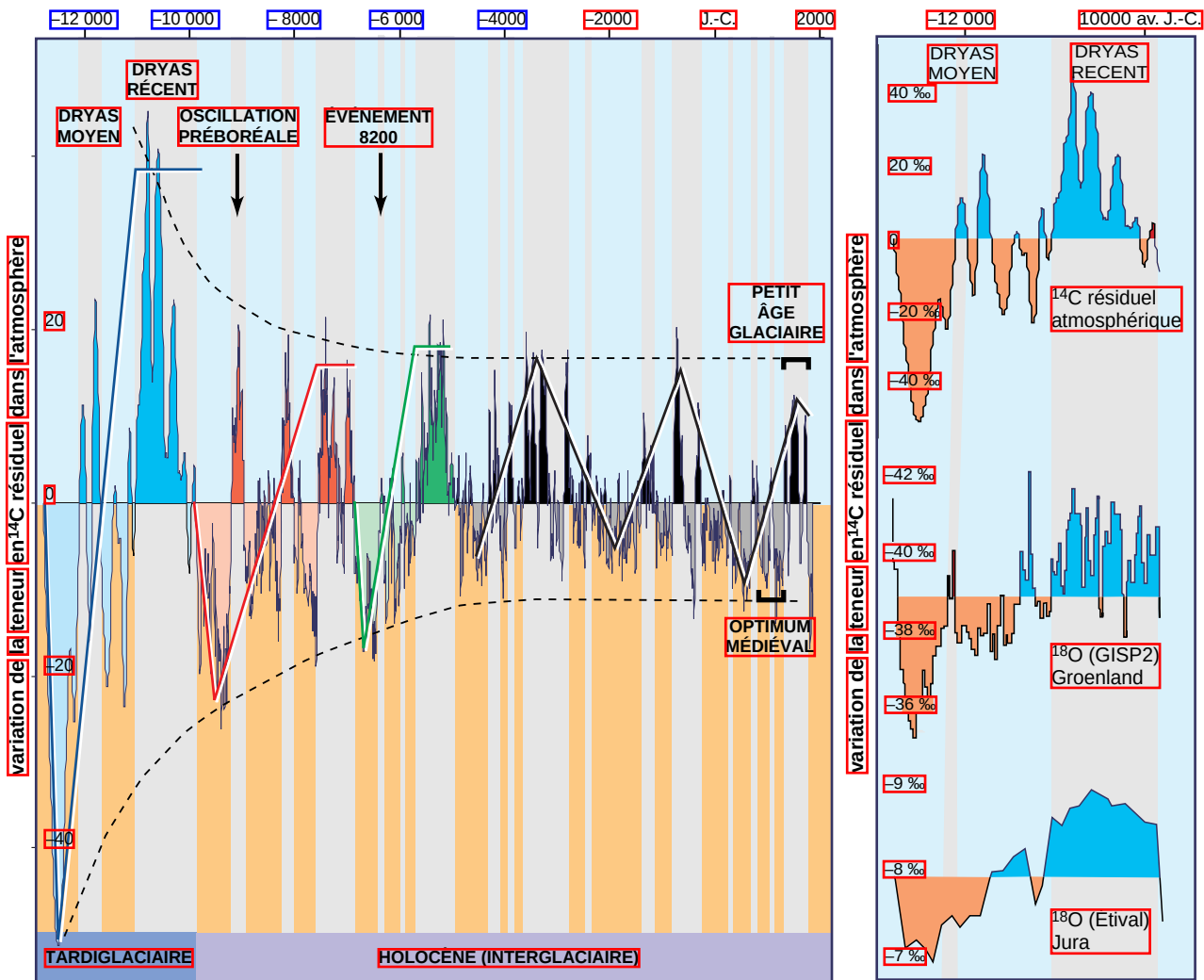
l'océan. Dans les deux cas, ils marquent l'arrêt d'un réchauffement et un net renversement de tendance du climat vers le refroidissement.

La parenté de structure interne qui existe entre les trois cycles successifs que nous venons de décrire à partir des variations du radiocarbone résiduel pendant le Tardiglaciaire et les débuts de l'Holocène suggère que nous avons affaire à la répétition d'un même processus : un brusque réchauffement associé à une réactivation rapide de la circulation thermohaline provoque une fonte accélérée des appareils glaciaires ; l'afflux soudain d'eau douce dans l'Atlantique Nord qui en résulte provoque à son tour un désamorçage partiel de la circulation thermohaline, qui se traduit dans l'immédiat par un brusque coup de froid (le Dryas moyen, l'oscillation préboréale ou l'événement 8200), puis par un renversement de tendance climatique qui conduit à un épisode froid plus durable, tel que le Dryas récent, et les périodes 8000-7000 avant J.-C. et 6000-5000 avant J.-C.

L'événement 8200 serait le contrecoup de la dernière étape de la déglaciation ; comme le Dryas moyen et l'oscillation préboréale, il coïncide d'ailleurs avec un brusque mais bref renforcement des valeurs du radiocarbone, qui suggère là encore un ralentissement de la circulation thermohaline. Cette dernière étape correspondrait à la phase finale de la déglaciation en Amérique du Nord, la calotte du Nord de l'Europe ayant alors complètement disparu, en raison de sa taille plus réduite. Elle correspondrait aussi au signal isotopique identifié par les Américains Mix et Riddiman dans les carottes extraites de l'océan Atlantique et daté des environs de 7000-5000 avant J.-C. Elle marquerait en particulier la brutale disparition de la dernière partie de la calotte Nord-américaine autour de la baie d'Hudson, entraînant le brusque drainage d'énormes lacs proglaciaires et l'afflux d'environ 1,2.10⁵ kilomètres cubes d'eau douce dans l'Atlantique Nord, il y a environ 8 500 ans.

Les trois cycles que nous venons de retracer structurent fortement la période de transition qui couvre la fin de la dernière glaciation et les débuts de notre interglaciaire. En 1992, observant et décrivant le premier de ces cycles enregistré par le rapport oxygène 18/oxygène 16 au Groenland, l'Américain W. Broecker s'interrogeait sur l'absence

4. Datation au carbone 14 et radiocarbone résiduel



L'âge d'un échantillon est mesuré par le rapport carbone 14 / carbone 12 : tous les 5 730 ans, la quantité de carbone 14 (ou radiocarbone) diminue de moitié. On a longtemps supposé que la teneur de l'atmosphère en carbone 14 restait constante au cours du temps, or ce n'est pas tout à fait le cas. Il faut donc corriger les âges donnés par le radiocarbone. La technique la plus précise consiste à dater par le radiocarbone des bois dont on connaît l'âge précis grâce à la dendrochronologie (étude des cernes de croissance des arbres). Les bois fossiles collectés par différents laboratoires en Amérique du Nord et en Europe ont permis d'établir la courbe des variations de la teneur de l'atmosphère en carbone 14 depuis 9900 avant notre ère. En datant des sédiments composés d'une succession de couches annuelles dans le bassin de Cariaco, au large du Venezuela, les géologues ont prolongé cette courbe jusqu'aux environs de -12500 avant notre ère.

La production de carbone 14 dans la haute atmosphère est modulée par le champ géomagnétique et par l'activité solaire : elle diminue quand l'intensité du champ géomagnétique et l'activité du Soleil se renforcent. En soustrayant les effets induits par le champ géomagnétique, on obtient la courbe des variations de la teneur de l'atmosphère en carbone 14 résiduel. Ces variations reflètent les changements de la circulation océanique, ainsi que la répartition du radiocarbone entre l'atmosphère, la biosphère et l'océan.

A gauche, la courbe du carbone 14 résiduel montre des cycles d'une périodicité d'environ 2 300 ans que l'on retrouve également dans l'histoire de la circulation atmosphérique polaire reconstituée à partir des poussières retrouvées dans les glaces du Groenland.

Ces cycles pourraient être liés à des changements de l'activité solaire, comme le suggère l'observation d'étoiles du même type que le Soleil. Les effets de ces variations de l'activité solaire sur le climat seraient amplifiés par la circulation océanique qui affecte elle-même la répartition du radiocarbone entre atmosphère et océan (voir l'encadré 3).

Les trois premiers cycles (en bleu, rouge et vert) contemporains de la déglaciation ont une forme asymétrique et une amplitude qui contrastent avec la symétrie et l'amplitude plus modeste et plus régulière des cycles suivants.

A droite, les variations de la teneur de l'atmosphère en carbone 14 résiduel se calquent sur les oscillations du climat enregistrées par le rapport oxygène 18/oxygène 16 au site de Summit, au Groenland, ou dans le lac d'Étival, dans le Jura. Les brusques chutes des valeurs du carbone 14 résiduel vers 12500 et 9500 avant notre ère, associées à une réactivation de la circulation thermohaline, ont pour corollaire de brusques réchauffements du climat au Groenland et en Europe.

d'un second Dryas récent qui, à l'image du premier, aurait pu logiquement suivre le second épisode de fonte accélérée après 9500 avant notre ère. Nous avons vu que les refroidissements qui se développent dans le Jura et les Alpes de -8000 à -7000 et -6000 à -5000 pouvaient être les équivalents – en termes de structure, mais bien affaiblis en termes quantitatifs! – du Dryas récent.

Modèles et prévisions

Les simulations numériques réalisées par les Allemands C. Schäfer-Neth et K. Statteger suggèrent qu'à volume égal le contrecoup climatique d'un brusque afflux d'eau douce dans l'Atlantique Nord est nettement plus important si cet afflux provient des côtes européennes que s'il se développe au large des côtes groenlandaises. Combiné avec la diminution progressive du volume d'eau douce mis en jeu dans les trois étapes successives de la déglaciation, ce modèle confirme le violent contrecoup climatique qu'a pu avoir la première phase de la déglaciation, mettant en œuvre un énorme volume d'eau douce arrivant dans l'Atlantique à la fois depuis les côtes européennes et celles d'Amérique du Nord.

Au contraire, la deuxième étape de la déglaciation, où les eaux douces d'origine européenne constituaient un apport secondaire par rapport aux eaux d'origine américaine, et la troisième étape, constituée principalement par de l'eau douce provenant d'Amérique du Nord et de l'Antarctique, sans apport européen, ont eu un contrecoup climatique de plus en plus affaibli.

En définitive, le système climatique semble avoir répondu à la déglaciation par une série d'oscillations dont l'amplitude s'apaise à mesure que la déglaciation s'achève, c'est-à-dire que le volume des afflux d'eau douce dans l'océan se réduit et que la source de ces afflux se déplace et s'éloigne des côtes européennes. La parenté de structure de chacun des cycles climatiques associées aux étapes successives de la déglaciation traduit sans doute le même mode de réponse de l'océan aux perturbations répétées qu'il subit tout au long de cette histoire. Vers 5000 avant notre ère, la déglaciation achevée, le système climatique s'équilibre enfin, ses oscillations étant désormais plus régulières et de moindre amplitude.

Refroidissement lié à l'effet de serre?

Quelles applications pouvons-nous tirer de cette histoire de la déglaciation pour le futur de notre climat? On sait aujourd'hui que la forte augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, liée aux activités humaines («effet de serre additionnel»), est un puissant facteur de déséquilibre du système climatique de la Terre. L'analyse des bulles d'air piégées dans les glaces du Groenland et les observations directes à partir de l'île de Mauna Loa dans les Hawaï montrent en particulier un accroissement accéléré de la teneur en gaz carbonique depuis la révolution industrielle. Elle laisse envisager un doublement de la valeur préindustrielle de cette teneur aux environs de 2030. Dans cette hypothèse, les simulations numériques prévoient un réchauffement allant de 1,9 à 5,2 °C.

Au regard de l'histoire que nous venons de parcourir, il est possible d'envisager la menace que fait peser sur notre climat l'effet de serre additionnel. De nombreux paléoclimatologues craignent que la fonte des glaces polaires entraînée par le réchauffement global ne perturbe et ne ralentisse la circulation thermohaline. Un accroissement des précipitations aux hautes latitudes, corollaire du réchauffement du climat et des eaux océaniques, pourrait renforcer le processus. Certes, si l'on en croit les simulations numériques évoquées plus haut et le modèle grandeur nature offert par les variations du climat pendant la déglaciation, l'absence actuelle de calotte glaciaire sur la Scandinavie écarte le danger de retour d'un épisode identique au Dryas récent. Cependant, un coup de froid du même type que l'événement 8200 n'est pas impossible. Le modèle mis au point par S. Rahmstorf, de l'Université de Postdam, montre la grande sensibilité de la circulation océanique : un brusque apport de 60 000 mètres cubes d'eau douce suffirait à perturber cette circulation. La circulation thermohaline est bien le talon d'Achille de notre système climatique.

Nous voici donc, du fait de la pollution de notre atmosphère, exposés aux mêmes menaces que nos ancêtres de la préhistoire. À cause des phénomènes associés à la déglaciation, ceux-ci ont subi de brusques coups de froid,

alors même que la Terre bénéficiait d'un maximum d'insolation! Le réchauffement global pourrait, à terme, conduire aussi à un refroidissement sensible de notre climat.

Avons-nous au moins le temps de voir venir le danger? La réponse que l'on peut apporter à cette question n'est pas rassurante, car les courbes climatiques les plus précises dont disposent les paléoclimatologues montrent que, le plus souvent, les changements climatiques associés à la déglaciation sont survenus brusquement, en moins d'un demi-siècle. On observe de véritables basculements du climat d'un état d'équilibre à un autre. Ces basculements, vraisemblablement à l'échelle d'une génération humaine, ont dû laisser nos ancêtres préhistoriques pour le moins perplexes.

Les paléoclimatologues s'efforcent depuis plus de vingt ans d'attirer l'attention de l'opinion publique et des politiques sur les menaces que fait peser sur nous l'effet de serre additionnel. Il s'agit d'une question complexe, encore loin d'être entièrement résolue par les scientifiques. Les résultats de simulations numériques réalisées récemment par l'Anglais R. Wood sont plutôt alarmants : ils suggèrent que le site de formation d'eaux profondes du Labrador pourrait se désamorcer au cours des trente prochaines années, c'est-à-dire avant 2029. Dès 1987, W. Broecker posait ouvertement la question de savoir si «nous ne jouons pas à la roulette russe avec le climat sans que personne sache vraiment ce qu'il y a dans le barillet»...

Michel MAGNY est directeur de recherches au Laboratoire de chrono-écologie (UMR 6565), à Besançon.

J.-C. DUPLESSY, *Quand l'océan se fâche. Histoire naturelle du climat*, Odile Jacob, 277 pages, 1996.

M. MAGNY, *Une histoire du climat. Des derniers mammoths au siècle de l'automobile*, Errance, 176 pages, 1995.

S. JOUSSAUME, *Climat, d'hier à demain*, CNRS Éditions, 1993.

U. VON GRAFENSTEIN et al., *A Mid-European Decadal Isotope Climate Record from 15 500 to 5 000 Years BP*, in *Science*, n° 284, pp. 1654-1657, 1999.

R.A. WOOD et al., *Changing Spatial Structure of the Thermohaline Circulation in Response to Atmospheric CO₂ Forcing in a Climate Model*, in *Nature*, n° 399, pp. 572-575, 1999.

Les magnétoiles

KEVIN HURLEY

Depuis 20 ans, des éclairs de rayonnement gamma répétitifs déchirent le ciel. Ce rayonnement émanerait d'étoiles à neutrons au fort champ magnétique, sujettes à des séismes analogues aux tremblements de terre, mais autrement plus puissants.

Le 27 août 1998 à 5 heures 22 en temps universel, la plus intense bouffée de rayonnement gamma jamais enregistrée atteint la Terre. Elle a commencé par un intense pic de rayonnement, puis s'est éteinte graduellement dans les cinq minutes suivantes, envoyant, comme un phare, un éclair de rayonnement gamma d'intensité décroissante toutes les 5,16 secondes. Les seuls témoins de cet extraordinaire phénomène furent les sondes spatiales qui voyageaient en silence à travers le Système solaire et des chercheurs qui surveillaient l'ionosphère ; diffusé et absorbé par cette couche de l'atmosphère terrestre, le rayonnement gamma n'a donc pas atteint le niveau de la mer.

Ce rayonnement provenait d'un objet de notre Galaxie qui intriguait les astronomes depuis des années, mais qui n'avait pas encore laissé entrevoir sa puissance phénoménale. L'étude de cet objet, ainsi que sa ressemblance avec plusieurs autres objets étudiés depuis une vingtaine d'années, nous a permis de conclure à l'existence d'un nouveau type d'étoile, que l'on a nommée «magnétoile», ou étoile magnétique (en anglais *magnetar*, contraction de *magnetic* et de *star*). Malgré leur rareté – jusqu'ici quatre d'entre elles ont été repérées –, les magnétoiles intéressent vivement les astronomes, car elles recèlent les champs magnétiques les

plus intenses de l'Univers (voir la figure 1).

Bien qu'elle n'ait pas été identifiée comme telle à l'époque, la première magnétoile a été observée le 5 mars 1979. Une flottille de neuf satellites avait été équipée de détecteurs de rayonnements gamma, afin d'étudier le phénomène nouveau des sursauts gamma. Aujourd'hui, les astronomes savent que ces «sursauts», de brefs éclairs de rayonnement gamma qui illuminent le ciel plusieurs fois par jour, résultent d'événements catastrophiques, coalescences d'étoiles à neutrons ou supernovae très puissantes, qui se produisent dans les milliards de galaxies entourant la nôtre. Cependant, à l'époque, le mystère était entier : les astronomes ignoraient si ces sursauts provenaient d'autres galaxies, de notre Galaxie, ou même du Système solaire.

Le sursaut gamma enregistré ce jour-là était le plus intense jamais observé (il détint ce record jusqu'au 27 août 1998). Connaissant les instants d'arrivée sur les sondes spatiales, les astronomes calculèrent le lieu d'émission du sursaut gamma avec précision. À la surprise générale, l'émission semblait provenir du vestige de supernova N49 situé dans le Grand Nuage de Magellan, une galaxie proche de la nôtre, à environ 150 000 années-lumière.

Ce sursaut semblait n'être qu'une version extrêmement intense d'un sursaut gamma classique, mais c'était la première fois qu'on pouvait rattacher un sursaut à un objet précis, tel un vestige de supernova, déjà observé à d'autres longueurs d'onde. C'était aussi le premier sursaut gamma périodique : l'intensité du rayonnement gamma augmentait et décroissait toutes les huit secondes. Enfin, dans les jours suivant ce sursaut majeur, les astronomes observèrent d'autres sursauts plus faibles de même provenance. La situation était totalement nouvelle.

Les sursauts gamma émanaient-ils des vestiges de supernovae, auquel cas leur origine était établie ? Ou bien avait-on découvert, au hasard d'un enregistrement de routine des sursauts gamma, un nouveau type de sursaut ? Le débat allait durer près de 20 ans.

Des étoiles à neutrons par milliards

Lorsqu'une étoile massive ordinaire a épuisé son combustible nucléaire, elle s'effondre avant d'exploser, en éjectant 90 pour cent de sa masse dans l'espace sous forme de gaz. Les dix pour

1. UNE MAGNETOILE est une étoile à neutrons dont le champ magnétique est des milliards de fois plus intense que les champs magnétiques que l'on parvient à créer en laboratoire. De temps à autre, lors de tremblement d'étoiles, ces objets émettent des bouffées périodiques de rayonnement gamma.

cent restants continuent de s'effondrer et forment un noyau dense de particules : une étoile à neutrons. Cette étoile possède une surface solide. Sa masse est à peu près équivalente à celle du Soleil, mais elle est comprimée à l'intérieur d'une sphère de dix kilomètres de rayon, de sorte que l'intensité de la force gravitationnelle à sa surface est cent milliards de fois celle de la surface terrestre.

À sa naissance, l'étoile à neutrons est un objet extrêmement chaud, mais sa température baisse en quelques années jusqu'à environ dix millions de degrés. Sa rotation est très rapide, jusqu'à 500 tours par seconde, et son champ magnétique est intense, car le champ magnétique stellaire initial est densifié lors de l'effondrement de la supernova. En partant d'une étoile dont le champ magnétique est initialement de un ou deux gauss (10^{-4} tesla), du même ordre de grandeur que celui de la Terre ou du Soleil, l'effondrement comprime ce champ jusqu'à 10^{12} gauss (10^8 teslas).

Notre Galaxie contient environ un milliard d'étoiles à neutrons, résidus des explosions de supernovae. Toutefois, comme les étoiles à neutrons rayonnent peu d'énergie décelable, seules quelques-unes sont détectées directement. Les étoiles à neutrons émettent essentiellement des ondes radio focalisées. Comme un phare qui éclaire à intervalles fixes un navire, certaines étoiles à neutrons éclairent la Terre de leur rayonnement radio régulier. Les astronomes connaissent environ un millier de telles étoiles, que l'on nomme pulsars. Plusieurs centaines d'entre elles sont aussi des sources de rayonnement X, qu'on ne détecte pas du sol, en raison de l'absorption atmosphérique, mais que des satellites enregistrent.

De nombreuses étoiles à neutrons sont dans des systèmes binaires, où

leur compagnon est une étoile ordinaire. La force gravitationnelle colossale de l'étoile à neutrons attire lentement le gaz de son compagnon et l'accélère à grande vitesse (une fraction notable de la vitesse de la lumière). Ce gaz s'écrase alors à la surface de l'étoile, libérant son énergie cinétique sous forme de rayonnement X. Dans de nombreux cas, cependant, on observe seulement un vestige ténu de supernova, c'est-à-dire les restes des couches externes de l'étoile qui a explosé, projetés dans l'espace à des vitesses supersoniques. Quand cette enveloppe de gaz rencontre des atomes du milieu interstellaire, elle est excitée et émet une faible lueur X qui peut persister 10 000 ans, voire davantage.

Ainsi, comme le sursaut du 5 mars 1979 semblait provenir du vestige de la supernova N 49, il était plausible que la source en soit une étoile à neutrons. La période de pulsation de huit secondes du sursaut sur le déclin restait cependant une énigme : en général, dès leur formation, les étoiles à neutrons sont en rotation très rapide, en raison de la conservation du moment cinétique de l'étoile mère. De la même façon qu'une patineuse accroît sa vitesse de rotation en rapprochant les bras de son corps, l'étoile à neutrons, très petite, tourne beaucoup plus vite que son étoile mère. Certes, à mesure que l'étoile à neutrons perd de l'énergie par émission de rayonnement radio, elle ralentit, mais trop lentement pour expliquer la vitesse de rotation observée : avec l'intensité des champs magnétiques estimés pour les étoiles à neutrons ordinaires, il faudrait cent millions d'années pour que la période de rotation initiale ralentisse à huit secondes, et l'âge de N49 n'est que de 5 000 ans.

Nouvelles sources, nouveaux déboires

Toujours en 1979, Evgueny Mazets et ses collègues de l'Institut Ioffe, à Saint-Petersbourg, annoncent la découverte d'une autre source de sursauts à répétition, qu'ils nomment 1900+14, d'après ses coordonnées célestes. La source est plus discrète : elle n'émet que trois courts sursauts de rayonnement gamma avant de se taire. Cette source se situe dans le plan de notre Galaxie, mais sa position exacte reste mal définie. De surcroît, la grande quantité de poussières et de gaz du plan galactique absorbe la lumière visible et rend impossible l'identification de cette source dans le visible.

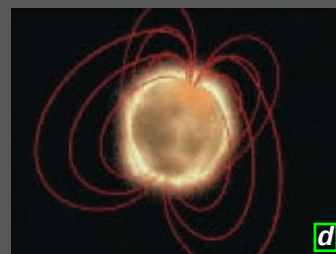
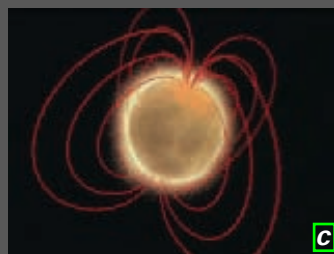
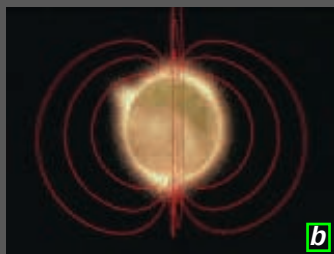
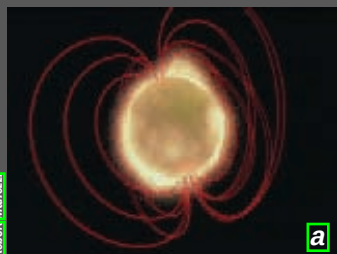
Après ces observations, les astronomes avaient encore du mal à préciser en quoi ces sources à répétition diffèrent des sources non répétitives de sursauts. S'agit-il de deux manifestations d'une même catégorie d'objets ?

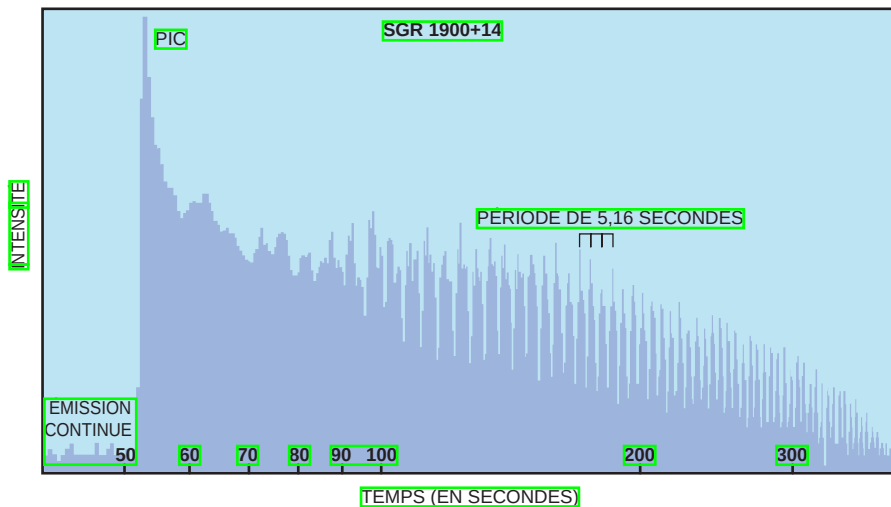
Sept ans sont nécessaires à la découverte d'une autre source à répétition : en 1986, Jean-Luc Atteia, du Centre d'études spatiales des rayonnements de Toulouse (CESR), et moi-même découvrons une nouvelle source, que nous nommons SGR 1806-20. Le sigle SGR signifie ici *Soft Gamma Repeater*, soit «source à répétition de rayonnement gamma mou».

Cette source, située dans une direction proche de celle du centre galactique, émet des rayonnements gamma de moindre énergie qu'une source ordinaire de sursauts gamma (d'où l'adjectif mou). Cette fois, les sursauts arrivent à une fréquence étonnante : en quelques mois, une centaine de sursauts sont enregistrés. Au moment de son maximum d'activité, la source émet jusqu'à dix sursauts par jour. Bien que

2. LE SPECTACLE D'UNE MAGNETOILE est figuré sur cette simulation. Situé à quelques centaines de kilomètres de l'étoile à neutrons, un observateur verrait une sphère en rotation avec des zones plus ou moins brillantes selon la température de la croûte de l'étoile (a, b, c) ; l'axe de rotation est vertical et on a représenté en rouge les lignes de champ magnétique, normalement invisibles. La période de rotation est de quelques secondes. Dans la suite, on fige la rotation (d). En raison de contraintes qui s'exercent sur la croûte, celle-ci craque. Après ce tremblement

d'étoile, la croûte est chauffée et fond par endroits, d'où l'apparition de nouvelles zones brillantes (e, f, g). Les électrons émis par les zones chaudes de la croûte se déplacent le long des lignes de champ magnétique et ils rayonnent une lueur orangée (h). De plus en plus d'électrons sont émis (i, j, k, l, m). La croûte se réarrange et les lignes de champ, attachées à la croûte, se déplacent (n, o, p). Ces oscillations des lignes de champ accélèrent les électrons qui perdent leur énergie en émettant un intense rayonnement gamma.





3. L'ÉMISSION GAMMA DU SURSAUT DU 27 AOÛT 1998, le plus intense sursaut jamais observé, a été enregistrée par la sonde *Ulysse*. Après un pic d'intensité qui a duré quelques secondes, l'émission a décliné avec de brefs sursauts qui revenaient toutes les 5,16 secondes.

relativement intenses, aucun de ces sursauts n'atteint l'ampleur de l'événement observé en 1979, et la source cesse ses émissions en novembre 1986. Tout comme 1900+14, la source se trouve dans une direction du plan galactique très obscurcie par les poussières, et n'a pas d'homologue visible évident.

Avec trois sources gamma à répétition connues, les astronomes soupçonnaient l'existence d'une nouvelle classe d'objets. Quelles étaient leurs caractéristiques communes ? D'abord, elles étaient répétitives. Ensuite, leur spectre (la quantité d'énergie en fonction de la fréquence) différait de ceux des sursauts gamma : le rayonnement des sursauts gamma à répétition est d'énergie moindre que celui des sursauts classiques. Enfin, les sursauts étaient généralement très courts, de l'ordre de 100 millisecondes.

Ces ressemblances n'étaient toutefois pas suffisantes pour unifier cette classe d'objets. Par exemple, le spectre de l'émission particulièrement intense du 5 mars 1979 se rapprochait de celui des sursauts gamma classiques, avec une grande proportion de rayons gamma de haute énergie. Les sursauts n'étaient pas tous courts, certains durèrent plusieurs secondes. Enfin, la cadence des répétitions était très variée,

et apparemment chaotique : certaines sources sont restées actives quelques jours, d'autres ont duré plusieurs mois.

Pour expliquer ces phénomènes, les théoriciens ont avancé une multitude de théories, dont certaines étaient carrément farfelues, invoquant par exemple des monopôles magnétiques ou des étoiles composées de matière sous forme de quarks. Aucune de ces théories n'a pu être vérifiée par l'observation : avec trois sources seulement, les données étaient insuffisantes.

Vers l'unification

En 1990 et 1991, on lança deux sondes spatiales équipées de nouveaux détecteurs destinés à étudier les sursauts gamma et les sources gamma à répétition. La première au départ, la mission *Ulysse*, mise au point par l'Agence spatiale européenne, avait pour objectif l'étude de l'héliosphère. Pour mener à bien cette mission, elle devait sortir du plan de l'écliptique, le plan de rotation de la Terre et des planètes, ce qui est coûteux en énergie. Aussi, avec mes collègues du CESR et de l'Institut Max-Planck de Garching, nous avons construit un instrument très léger, nommé GBR (pour *Gamma-Ray Burst*, ou «sursaut de rayonnement gamma»).

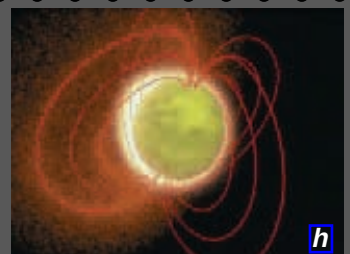
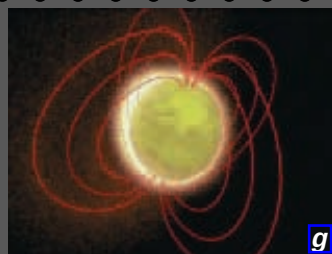
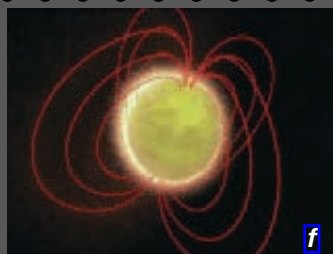
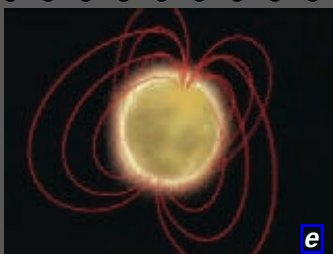
L'instrument ne pesait que deux kilogrammes avec une surface sensible de 20 centimètres carrés.

À l'opposé, l'Observatoire *Compton* (GRO), mis au point par la NASA, était la plus lourde sonde spatiale scientifique jamais mise en orbite. Elle emportait notamment huit détecteurs qui traquaient les sources gamma transitoires (BATSE), dont chacun avait une surface de collecte cent fois plus grande que celle d'*Ulysse* (pour des raisons d'orientation, chaque sursaut était reçu sur un ou deux de ces détecteurs).

Malgré leurs différences de conception, les deux instruments étaient complémentaires. La spécialité de BATSE était la détection des sursauts très faibles, mais avec une incertitude de plusieurs degrés sur la localisation. En raison de sa petite taille, le détecteur d'*Ulysse* était peu sensible et n'enregistrait que les sursauts les plus intenses. Toutefois, comme *Ulysse* était loin de la Terre, lorsque les deux engins détectaient un même sursaut, la comparaison des temps d'arrivée du signal sur les deux détecteurs autorisait la localisation de la source avec une excellente précision, parfois inférieure à la minute d'angle. Cette complémentarité fut cruciale dans l'étude des sources gamma à répétition. Ainsi, en 1992, lorsque SGR 1900-14 s'est brièvement manifesté par quatre sursauts, après de longs mois de silence, nous avons déterminé sa position avec une bien meilleure précision (voir la figure 4).

L'observation multi-longueurs d'onde

En 1993, Shrinivas Kulkarni et ses collègues de l'Institut de technologie de Californie ont déterminé qu'un bon moyen de trouver la nature des sources gamma à répétition serait de les rechercher aux longueurs d'onde radio. Contrairement à la lumière visible, les ondes radio traversent sans trop d'absorption les zones de poussières de notre Galaxie. De surcroît, les électrons de haute énergie, présents dans les restes de supernovae, émettent dans



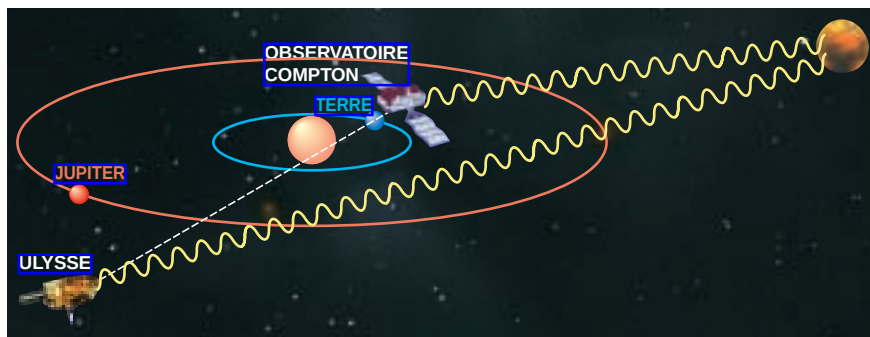
le domaine radio : si les vestiges de supernovae correspondaient aux sources gamma à répétition, ils seraient faciles à repérer en radio.

Pour étayer leur hypothèse, les astrophysiciens ont cherché, dans un catalogue qui recense les restes de supernovae qui émettent des ondes radio, un objet dont la position coïnciderait avec celle de SGR 1806-20. La source radio G 10.0-0.3 était à l'endroit visé (son nom correspond aux coordonnées de la source radio, exprimées dans le système de coordonnées galactiques). Cette correspondance indique que la source de rayonnements gamma est dans le vestige de la supernova, mais elle n'en constitue pas une preuve absolue : les deux sources pourraient être alignées dans le ciel par pure coïncidence.

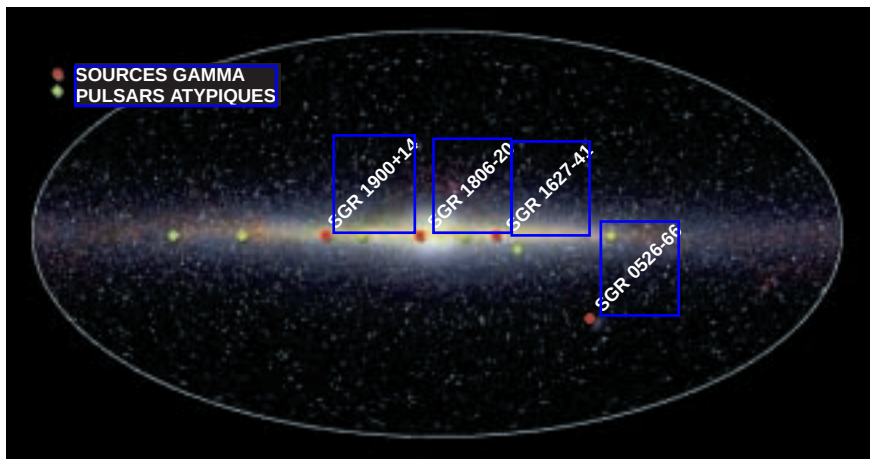
Par chance, en 1993, après un sommeil de sept ans, SGR 1806-20 se réveilla. Cette fois, les scientifiques étaient prêts. Les sursauts furent enregistrés non seulement par BATSE et par *Ulysse*, mais également par le satellite japonais ASCA dont la caméra, sensible aux rayons X, fut pointée en direction de la source. Par un autre hasard heureux, la source émit un sursaut alors même que cette caméra X l'observait, ce qui permit la détermination de sa position à une minute d'arc près environ. Le sursaut émanait bien du vestige radio de la supernova, et leur lien fut définitivement établi.

De surcroît, la source continua à émettre des rayons X alors qu'elle n'émettait plus de rayonnement gamma. Or, une source X ponctuelle dans un reste de supernova est la signature de la présence d'une étoile à neutrons. D'après le spectre X enregistré, les astronomes établirent que la source du sursaut était une étoile à neutrons dans un état d'activité lente, mais continue.

Après la localisation de SGR 1806-20 dans un vestige de supernova, plusieurs astronomes ont recherché un reste de supernova qui pourrait être associé à SGR 1900+14. Chryssa Kouveliotou et ses collègues du Centre Marshall de la NASA proposèrent plusieurs candidats, mais, bien que tous soient



4. PAR TRIANGULATION, on a localisé la source du sursaut gamma du 27 août 1998 à moins d'une minute d'angle près. Deux détecteurs, BATSE et GRB, respectivement à bord de l'Observatoire Compton et de la sonde Ulysse, ont enregistré le sursaut. Comme Ulysse était alors loin de la Terre, en comparant les temps d'arrivées du sursaut sur les deux détecteurs, les astronomes déduisent précisément la position de la source.



5. POSITION DES SOURCES GAMMA A RÉPÉTITION (SGR) et des pulsars atypiques par rapport à la Voie lactée. Excepté SGR 0526-66, située dans le Grand Nuage de Magellan, toutes ces sources sont dans notre Galaxie et proche du plan galactique.

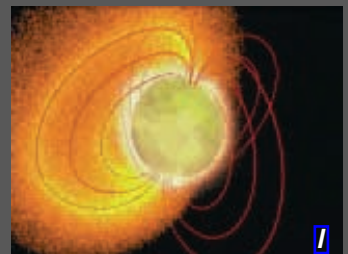
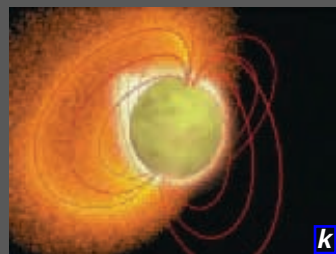
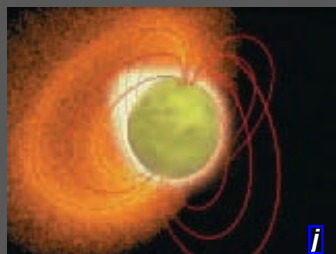
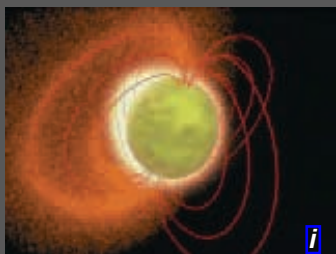
proches de la source, aucun ne correspondait exactement à sa position.

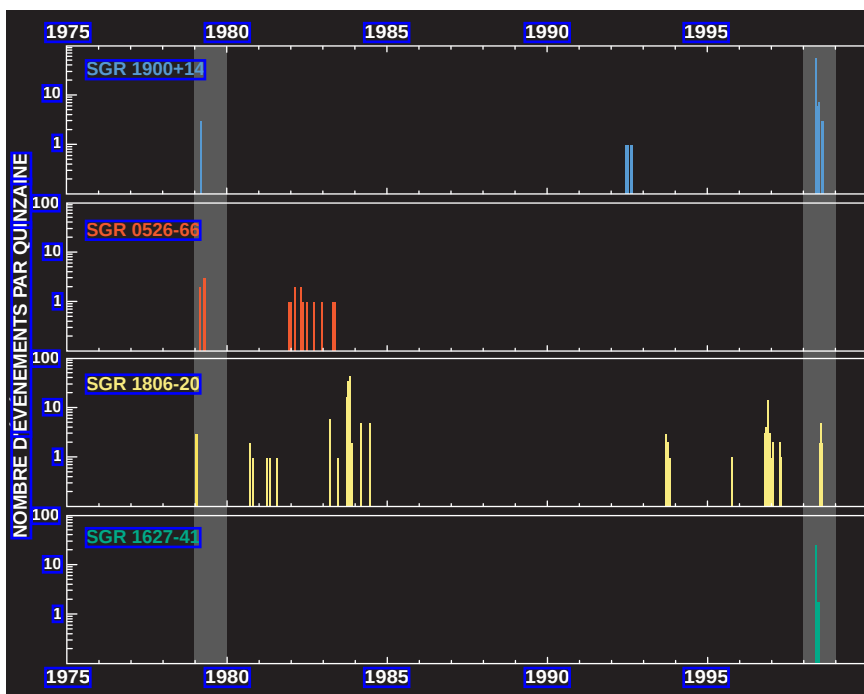
L'observation à une autre longueur d'onde serait-elle plus efficace? Comme les ondes radio, les rayons X traversent des régions où la lumière visible est absorbée. En raison des électrons de haute énergie qu'ils contiennent, les restes de supernovae émettent parfois des rayons X. De même, les étoiles à neutrons que l'on trouve au cœur des restes de supernovae sont de bonnes sources de rayons X.

La recherche de l'homologue de la source gamma a alors repris, mais dans le domaine X. Gautham Vasisht et ses collègues de l'Institut de technologie de Californie ont compulsé un catalogue

de sources de rayonnement X. Ils ont trouvé plusieurs sources pouvant correspondre à SGR 1900+14, mais, comme cela avait été initialement le cas pour SGR 1806-20, ces sources pouvaient simplement être sur la même ligne de visée que la source gamma. Pour le vérifier, il fallait observer la source avec un instrument de meilleure résolution.

Mes collègues et moi avons fait une demande d'observation prolongée de SGR 1900+14 en rayons X avec le satellite allemand ROSAT. Cet observatoire en orbite autour de la Terre est équipé d'une caméra à rayons X très sensible, capable de déterminer la position des émetteurs célestes de rayons X avec une précision meilleure que la minute





6. L'HISTOIRE DE LA DECOUVERTE DES MAGNETOILES commence à la fin des années 1970 avec la découverte de la première source de sursauts gamma à répétition. À la fin des années 1980, on connaissait trois telles sources, mais on ignorait leur origine. En 1992, la théorie des magnétoiles a unifié ces observations en un modèle cohérent, corroboré par l'observation récente d'une quatrième source gamma à répétition.

d'angle. Nous avons alors confirmé la présence d'une source X à la position de la source gamma, mais il n'était toujours pas exclu qu'il s'agisse d'une coïncidence. Néanmoins, nous étions alors enclins à penser que deux des sources gamma à répétition connues émettaient des rayons X en continu.

Peu de temps après, Richard Rothschild, de l'Université de San Diego, ajouta la troisième source à répétition à cette liste : à l'aide de ROSAT, il montra que SGR 0525-66, d'où nous était parvenu le puissant sursaut du 5 mars 1979, était également une source continue de rayonnement X.

Outre leur caractéristique d'émission de rayonnement gamma, ces sources gamma à répétition avaient deux autres propriétés communes : elles émettaient du rayonnement X, et elles semblaient localisées dans des restes de supernovae. Vraisemblablement, ces émissions gamma émanaient d'étoiles à neutrons, mais d'un type

nouveau. La question s'imposait : par quel mécanisme des étoiles à neutrons émettraient-elles des sursauts de rayonnement gamma ?

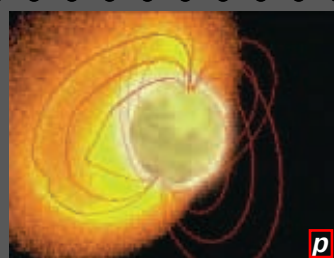
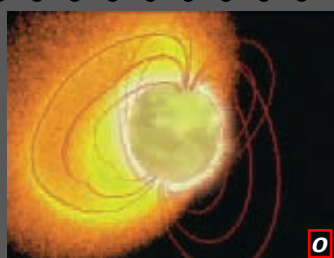
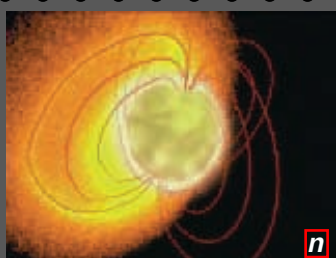
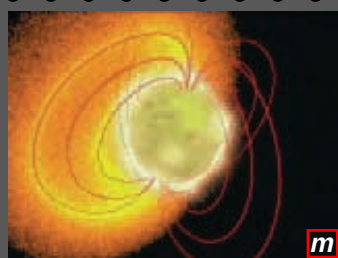
Les séismes émetteurs

En 1992, Bohdan Paczynski, de l'Université de Princeton, émit une hypothèse audacieuse : la source de l'émission très énergétique du 5 mars 1979 serait bien une étoile à neutrons, mais dont le champ magnétique serait mille fois plus intense que celui des étoiles à neutrons ordinaires. Un tel champ constituerait un vaste réservoir d'énergie où l'étoile puiserait l'énergie des sursauts. De plus, avec un champ magnétique intense, le phénomène de diffusion est réduit. Or, dans la diffusion entre les photons du rayonnement gamma et les électrons ambiants, l'énergie des photons qui s'échappent de l'étoile est transférée aux électrons. Ainsi, avec un intense champ magné-

tique, la diffusion est faible, et le flux de rayonnement gamma s'échappe sans perte d'énergie.

Si cette hypothèse proposait une source d'énergie pour les sursauts, elle n'expliquait pas leur cause. En 1995, Chris Thompson, de l'Institut canadien d'astrophysique théorique, à Toronto, et Rob Duncan, de l'Université du Texas, publièrent un long article faisant le lien entre la théorie des champs magnétiques intenses et les nombreuses années d'observation des sources gamma à répétition. Dans ce modèle qu'ils nommèrent «magnétoile», l'intense champ magnétique de l'étoile à neutrons, ancré dans sa croûte solide (comme le champ magnétique d'un aimant est ancré dans ce dernier), exerce sur celle-ci une contrainte. Sous l'effet de cette force, la croûte de l'étoile à neutrons craque de temps à autre, ce qui réduit la contrainte. Bien que ce tremblement de croûte reste confiné à une région de la surface de l'étoile et bien qu'il ne représente qu'une faible fraction de l'énergie interne de l'étoile à neutrons, il est extrêmement puissant à l'échelle des tremblements terrestres. L'énergie libérée lors d'un tremblement de croûte typique correspondrait à un tremblement de terre de magnitude 14, d'une intensité un million de fois supérieure aux séismes terrestres de magnitude 8 qui détruisent des villes entières.

Ces tremblements de croûte secouent violemment les lignes de champ magnétique attachées à la surface de l'étoile. De la même manière que le champ magnétique terrestre piège des particules chargées, comme dans les ceintures de Van Allen, le champ magnétique de l'étoile à neutrons se comporte comme un piège à particules. Dans le cas de la magnétoile, les violentes secousses subies par les lignes de champ magnétique accélèrent des électrons créés dans les champs intenses jusqu'à des énergies très élevées qu'elles perdent par émission de rayonnement synchrotron : les sursauts gamma (le rayonnement synchrotron est émis par toute particule



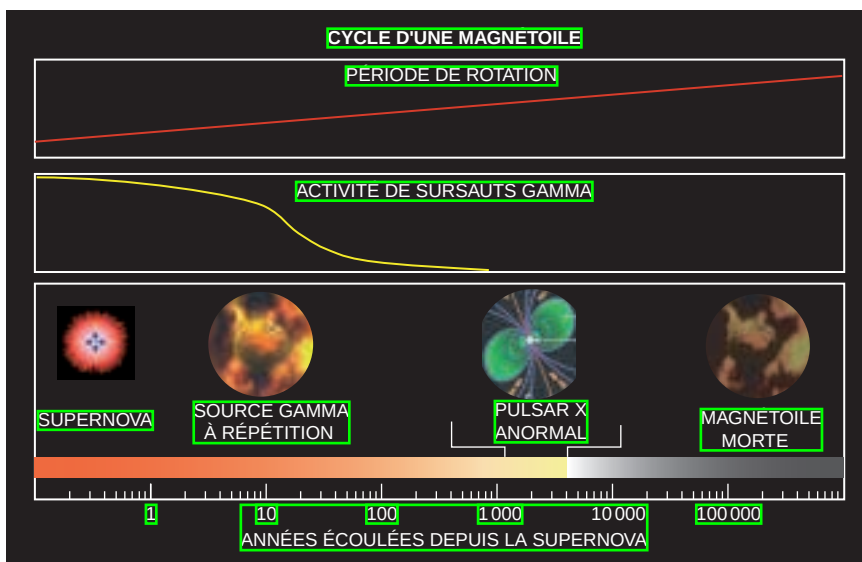
chargée accélérée). Ce mécanisme explique la majeure partie de l'activité observée, y compris les sursauts moins énergiques, mais pas les phénomènes plus rares de sursauts majeurs, tels que ceux du 5 mars 1979 et du 27 août 1998, car l'énergie libérée par ces tremblements de croûte superficiels n'est pas suffisante.

Un mécanisme plus global intervient alors. Les forces exercées à la surface de l'étoile à neutrons par le champ magnétique ne sont pas totalement éliminées par les craquements localisés de la croûte. Sur une période d'une centaine d'années, les contraintes résiduelles s'accumulent sur toute la surface de l'étoile, et un tremblement de croûte ne suffit pas à les réduire. À cette étape, un séisme stellaire d'une violence inouïe survient : l'ensemble de la croûte de l'étoile se fracture en profondeur, et l'énergie engendrée équivaut à celle d'un séisme de magnitude 22.

Suite à cet événement catastrophique, la surface de l'étoile se réaménage, des régions d'où partent des lignes de champ magnétique de polarités opposées sont entraînées avec la croûte vers de nouveaux sites. Lorsque des lignes de champ de polarités opposées se rencontrent, elles s'annihilent et libèrent l'énergie qu'elles renferment. Cette énergie peut être directement utilisée pour l'accélération d'électrons à de grandes énergies ; ceux-ci se désexcitent alors en émettant des rayons gamma de haute énergie dans un sursaut important. Certaines portions de la surface sont chauffées, peut-être jusqu'au point de fusion de la croûte de l'étoile à neutrons, essentiellement constituée de fer. Cette fusion crée des points chauds qui subsistent longtemps après le sursaut initial. Eux aussi se refroidissent en émettant des rayons gamma, et comme l'étoile tourne, les points chauds en rotation apparaissent et disparaissent : le rayonnement gamma apparaît sous forme d'une émission périodique.

Déplacement rapide et rotation lente

La force du modèle de magnétoile réside dans le fait que non seulement il explique la plupart des caractéristiques des sources gamma à répétition, mais qu'il prévoit aussi certaines caractéristiques vérifiables. Entre autres, il prévoit que les étoiles à neutrons à l'origine des sources gamma à répétition sont éjectés



7. UNE MAGNÉTOILE COMMENCE SA VIE en tant que supernova, une explosion d'étoile. Durant l'explosion, l'étoile à neutrons se transforme en une puissante source de rayonnement gamma à répétition. Cette phase dure 10 000 ans environ, après quoi, durant 40 000 ans environ, l'étoile à neutrons devient un pulsar X «anormal», une étoile à neutrons à la rotation particulièrement lente. Finalement, la magnétoile n'émet plus de rayonnement décelable et devient un objet sombre.

de leur lieu de naissance. Les astrophysiciens supputent que le fort champ magnétique des magnétoiles, 1 000 fois plus intense que celui des étoiles à neutrons ordinaires, focalise les neutrons émis juste après l'explosion. Comme un tuyau d'arrosage qui part dans la direction opposée à celle du jet d'eau, par réaction, l'étoile à neutrons résultante est accélérée jusqu'à 1 000 kilomètres par seconde. Les observations confirment la mobilité des magnétoiles : on ne les observe pas au centre des vestiges de leur supernova, mais assez décentrées, voire très éloignées.

Autre caractéristique attendue : les magnétoiles perdraient leur énergie de rotation assez vite par émission d'ondes radio, car le freinage de la rotation est proportionnel au carré du champ magnétique et à l'inverse de la période. La vérification de cette prédiction n'était pas chose aisée, car l'allongement prévu n'est que de deux millisecondes par an. Grâce au satellite X de la NASA Rossi, Ch. Kouveliotou et ses collègues ont observé ce ralentissement.

Le modèle semble en mesure d'expliquer un autre mystère de l'astrophysique, celui des prétendus pulsars atypiques à rayons X. Ces derniers sont des étoiles à neutrons en rotation lente, sans compagnon apparent. Ils sont anormaux, dans le sens où ils sont plus lents que ce que l'on attendrait d'une étoile à neutrons isolée et que leur spectre X est plus mou. S'agit-il de vieilles magnétoiles ? La lenteur de leur

rotation corrobore cette idée, puisque la période de rotation des magnétoiles est supérieure à celle des étoiles à neutrons ordinaires.

Combien y a-t-il de magnétoiles ? Une supernova sur dix donnerait naissance à une magnétoile, c'est-à-dire environ une tous les mille ans (dans une galaxie comme la nôtre, il y a une nouvelle supernova par siècle). La raison n'en est pas très claire, mais cette fréquence est vraisemblablement liée aux détails de l'explosion. L'étoile à neutrons nouvellement formée commence son existence en rotation très rapide, ce qui engendre à l'intérieur de l'étoile un mécanisme qui multiplie son champ magnétique par un facteur compris entre 100 et 1 000. Pendant les 10 000 premières années de sa vie, la magnétoile est une source gamma à répétition, et connaît des périodes d'activité au cours desquelles elle émet soit une succession de sursauts courts et relativement faibles (à des intervalles de quelques années), soit un sursaut majeur (à peu près un par siècle). Elle évolue ensuite en un pulsar à rayons X anormal et reste observable sous cette forme pendant environ 40 000 ans environ. Après cette période, la magnétoile sombre dans l'inactivité et l'obscurité. Elle cesse d'évoluer et rentre dans les rangs des milliards d'objets sombres de notre Galaxie (voir la figure 6).

Si ces estimations sont justes, il devrait y avoir, à un moment donné, environ dix sources gamma à répétition

dans notre Galaxie. Jusqu'à aujourd'hui, nous en avons trouvé trois, dont deux dans notre Galaxie. Ces derniers mois, Ch. Kouveliotou, E. Mazets et moi-même avons analysé les données de nos expériences et en avons conclu à la présence d'une troisième magnétoile au sein de notre Galaxie. Cet objet, SGR 1627-41, a les mêmes caractéristiques que les trois autres magnétoiles, à savoir la répétition, le spectre énergétique mou, les sursauts courts et une localisation près d'un reste de supernova avec une émission de rayonnement X associée.

Nous avons peut-être ainsi identifié le tiers des magnétoiles de notre Galaxie, mais il est également possible que la théorie surestime légèrement le nombre d'objets de ce type en activité à un moment donné. En astrophysique, un résultat exact à un facteur trois près constitue déjà une approximation satisfaisante.

Des prédictions vérifiables sont souvent le talon d'Achille d'un modèle par ailleurs solide. Faute de prévisions, un modèle peut être impossible à vérifier, mais, dans le cas où des prédictions sont possibles, elles conduisent souvent à l'abandon du modèle, quand les observations les mettent en défaut. Jusqu'à présent, le modèle de la magnétoile a passé avec succès les tests qu'on a pu lui faire subir.

A mesure que le temps passera et que nous en apprendrons davantage sur ces étranges objets grâce à une instrumentation spatiale plus élaborée, nous devons peut-être ajuster la théorie pour incorporer de nouvelles données. Ce modèle constitue pour l'instant la meilleure explication d'une énigme astronomique vieille de vingt ans, en invoquant les champs magnétiques les plus intenses connus de l'Univers.

Kevin HURLEY est astronome à l'Université de Berkeley.

K. HURLEY et al., *Precise Interplanetary Network Localization of a New Soft Gamma Repeater SGR1627-41*, in *Astrophysical Journal Letters*, vol. 519, pp. L143, 1999.

K. HURLEY et al., *ASCA Discovery of an X-ray Pulsar in the Error Box of SGR1900+14*, in *Astrophysical Journal Letters*, vol. 510, pp. L111, 1999.

K. HURLEY et al., *A Giant Periodic Flare from the Soft Gamma Ray Repeater SGR1900+14*, in *Nature*, vol. 397, p. 41, 1999.

Réquisitoire contre les simulations nucléaires

CHRISTOPHER PAINE

Le remplacement des essais nucléaires par des simulations numériques a de nombreux inconvénients.

La première utilisation militaire de la bombe atomique, en août 1945, a fait 210 000 victimes à Hiroshima et à Nagasaki. Dans les décennies qui ont suivi, l'urbanisation croissante et l'accroissement de la puissance des armes thermonucléaires ont centuplé leur pouvoir destructeur : aujourd'hui, l'explosion d'une ou deux bombes nucléaires au-dessus de Bombay ou de Tokyo anéantirait 15 millions de personnes.

À la fin de la guerre froide, de nombreux pays ont négocié un traité qui interdit les essais nucléaires : le Traité d'interdiction totale des essais nucléaires limite les recherches sur la fabrication de nouveaux types de bombes, ainsi que les tests de validation des armes entreposées. À lui seul, ce traité ne peut empêcher la dissémination des armes nucléaires, mais il devrait ralentir la mise au point d'armes fondées sur les réactions de fusion.

Bien que l'enjeu soit la fin de la course aux armements nucléaires et une limitation de l'accès à l'arme nucléaire par les petits États guerriers, plusieurs pays tels que les États-Unis, la Russie, la Chine ou l'Inde n'ont toujours pas ratifié le traité. Les États-Unis, notamment, qui avaient naguère prôné le désarmement, sont en queue de peloton dans la lutte contre la prolifération nucléaire. Les signataires du traité examinent l'avancement d'une entrée en vigueur de celui-ci, mais les discussions sont entravées par les hésitations américaines.

Sous la conduite de Bill Clinton, l'armée américaine se déclare prête à envisager un avenir sans essais nucléaires, mais elle veut d'abord des armes perfectionnées. Afin d'évaluer

et de perfectionner l'arsenal nucléaire, le gouvernement et la majorité républicaine du Congrès américain soutiennent un «programme de gestion et de surveillance scientifique des arsenaux», qui associe, comme le programme français, des simulations numériques de pointe et de nombreuses expériences de laboratoire ; ce programme doit, selon ses partisans, donner aux États-Unis la capacité d'effectuer des simulations tridimensionnelles détaillées d'explosions nucléaires.

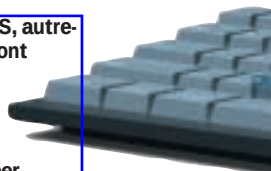
Une directive du Congrès, dissimulée dans une loi budgétaire de la défense, a créé ce programme en 1993. Le budget alloué est géré par le Bureau des programmes de défense du ministère de l'Énergie ; sur 15 ans, 420 milliards de francs devraient être dépensés. C'est près de trois fois le coût du Projet Manhattan (le projet de construction des premières bombes atomiques, lors de la Seconde Guerre mondiale) ou de la mission Apollo. Le gouvernement américain dit avoir besoin d'une capacité d'«expérimentation virtuelle» pour garantir le transport et l'entreposage des armes nucléaires en toute sécurité par temps de paix, et aussi pour connaître l'efficacité des armes qui seraient construites en cas de conflit.

Les essais virtuels remplaceraient, au moins partiellement, les explosions souterraines. Ils montreraient comment modifier les armes nucléaires pour changer leurs performances et pourraient servir à la mise au point d'armes nouvelles, qui pourraient être testées immédiatement en cas de sortie rapide du Traité d'interdiction des essais. Ce gros programme a clairement pour but d'apaiser des forces électorales qui s'opposent à l'interdiction des essais. Il

est risqué, car si ses objectifs ambitieux ne sont pas atteints, les opposants au traité auront de nouvelles raisons d'exiger le report de la ratification du traité jusqu'à ce que l'efficacité des simulations soit démontrée.

Même si le programme atteint ses buts, il est contestable à bien des égards. D'un point de vue diplomatique global, le lancement d'un programme d'essais virtuels fait perdre une occasion importante de désarmement : on se lance dans un nouveau programme militaire, au lieu de tendre vers un désarmement nucléaire global. Pourtant les États-Unis furent l'un des architectes principaux du traité, qui limitait à cinq le nombre de puissances nucléaires reconnues en échange de l'engagement pris par ces puissances de réduire leurs programmes nucléaires militaires. Avec le programme de surveillance, cependant, le ministère américain de l'Énergie cherche à accroître les capacités de conception d'armes nucléaires que l'interdiction des essais tente justement de contraindre. Pis encore, le programme risque de pousser les pays sans force nucléaire ni capacité de calcul à effectuer des essais nucléaires. Enfin il prône des collaborations, sur des thèmes stratégiques, entre les laboratoires militaires américains et la communauté scientifique internationale : autrement dit, le programme de surveillance accroît les risques de prolifération nucléaire.

1. LES ESSAIS NUCLÉAIRES, autrefois effectués sous terre, sont aujourd'hui interdits par un traité international. Plusieurs pays ont des programmes de simulation de ces essais à l'aide de superordinateurs et de lasers puissants.





Ordinateurs et laboratoires

Le ministère américain de l'Énergie a conçu le programme de surveillance pour éviter les essais nucléaires, mais il a simultanément donné aux États-Unis un moyen de réactiver ses laboratoires militaires. La communauté nucléaire des États-Unis, et ses alliés au Congrès, ont lutté contre l'interdiction des essais pendant toute la guerre froide, mais, en septembre 1992, le Congrès a finalement interdit les tests nucléaires, fixant le 30 septembre 1996 comme date limite des essais américains et comme début d'une négociation d'un traité international d'interdiction des essais. B. Clinton a prolongé deux fois le moratoire unilatéral américain et, en août 1995, il a pris la décision de chercher une «solution zéro» – une interdiction de toutes les explosions expérimentales, quelle que soit les réactions nucléaires utilisées. Cette année-là, les laboratoires américains de recherche sur les armes nucléaires – Los Alamos, Sandia et Lawrence Livermore – n'avaient plus effectué de tir expérimental depuis près de trois ans.

Les budgets alloués aux activités nucléaires militaires décroissaient depuis dix ans, et les personnels des arsenaux nucléaires pensaient à changer d'activité ; toutefois le programme de surveillance a relancé les activités. Le financement annuel, de 27 milliards de francs en moyenne, est aujourd'hui supérieur à ce que dépensait le ministère américain de l'Énergie (22 milliards de francs par an) pour l'armement pendant la guerre froide.

Le programme se fonde principalement sur trois superordinateurs, qui sont parmi les plus rapides du monde. Équipées de plusieurs milliers de microprocesseurs qui calculent en parallèle, ces machines font deux billions d'opérations par seconde. Le ministère américain de l'Énergie prévoit d'utiliser des ordinateurs 100 fois plus rapides en l'an 2005.

Ces ordinateurs traitent des données recueillies en laboratoire : une énorme infrastructure expérimentale indique le comportement des matériaux constitutifs des armes aux températures et aux pressions extrêmes, et les concepteurs d'armes nucléaires font des expériences coûteuses pour

vérifier leurs prévisions informatiques. Par exemple, comme on connaît mal les phénomènes qui ont lieu quand les rayons X issus de la fission explosive du premier étage d'une arme chauffent l'étage secondaire, où a lieu la fusion, un budget de 12 milliards de francs a été alloué à la construction de nouveaux laboratoires, telle l'Infrastructure américaine de fusion, au Laboratoire Lawrence Livermore. Quand cette installation fonctionnera (après 2005), des faisceaux laser puissants tenteront de produire une impulsion de rayons X possédant la forme et la durée nécessaires pour comprimer et chauffer uniformément une minuscule gouttelette gelée de deutérium et de tritium, fusionnant ces isotopes lourds de l'hydrogène selon des réactions observées dans les bombes nucléaires ou dans les étoiles.

Les risques de prolifération

Un programme de recherches aussi ambitieux favorise la prolifération. Tout d'abord, il est si hypocrite qu'il prive les États-Unis de tout crédit moral dans les discussions internationales : certains signataires du Traité d'interdiction des essais nucléaires ne respectent celui-ci que s'ils sont convaincus de la bonne foi américaine. D'autre part, des pays qui disposent déjà de l'arme nucléaire et qui n'auraient pas les moyens d'un programme analogue risqueraient de percevoir un déséquilibre stratégique et de se retirer du traité.

Selon les partisans du programme d'essais virtuels, les objectifs visés ne seront atteints qu'au prix d'une collaboration renforcée entre les spécialistes des armes nucléaires et la communauté scientifique. En l'absence d'explosions expérimentales pour valider les performances des armes, des expertises scientifiques s'imposeront, et des arbitrages nécessiteront probablement l'intervention de chercheurs de la recherche civile.

D'ailleurs, le programme actuel prévoit une intervention de la communauté scientifique bien plus vaste que de simples évaluations ou que des présentations occasionnelles, lors de réunions : l'embauche de scientifiques de haut niveau semble être la condition du succès de l'opération. Financés par des subventions quinquennales s'élevant à plusieurs



2. PLUSIEURS MILLIERS DE PROCESSEURS fonctionnent en parallèle dans ce superordinateur qui est utilisé pour la simulation des explosions nucléaires, aux Laboratoires Sandia. L'ordinateur est l'un des plus rapides du monde (le technicien représenté ici vérifie les câbles qui relient deux des huit blocs de l'ordinateur).

dizaines de millions de francs, cinq centres de recherches universitaires et de nombreux chercheurs isolés élaborent les modèles mathématiques et les algorithmes informatiques qui analysent les phénomènes physiques qui ont lieu lors des explosions nucléaires. Afin de valider les modèles physiques et les techniques numériques qui serviront dans les simulations des explosions nucléaires, les chercheurs utilisent des systèmes de complexité analogue, tels que turbines à gaz, moteurs de fusée ou étoiles périodiques.

Pour les partisans du programme de simulation, cette dissémination de la recherche scientifique de pointe sur les armes est une forme utile de «dissuasion scientifique», qui remplacera les tests nucléaires dans ce rôle. Toutefois elle a de graves inconvénients : en donnant à tous les pays des compétences qu'ils n'avaient pas toujours, elle menace la paix dans le monde.

Faux choix

Dans leur empressement à lancer un programme techniquement stimulant de simulation d'armes nucléaires, les organisateurs du programme de surveillance ont mis les pouvoirs exécutif et législatif en face d'un dilemme : soit adopter le programme des essais virtuels et accepter la responsabilité d'une prolifération, soit perdre confiance dans la fiabilité et la sécurité des arsenaux au milieu de la prochaine décennie. Ce dilemme est fondé sur plusieurs idées fausses.

En premier lieu, la sécurité des ogives nucléaires ne justifie pas un programme de plusieurs dizaines de milliards de francs. On assure la sécurité des armes nucléaires à l'aide de clôtures, de gardes, de fusils, de systèmes d'alarme, et le risque de détonation accidentelle d'une arme nucléaire ne s'accroît que si le dispositif est mal

conçu. La sensibilité des explosifs chimiques utilisés dans les ogives nucléaires n'augmente pas avec l'âge, et les circuits qui isolent électriquement le système d'allumage de l'ogive peuvent être testés et remplacés sans essais nucléaires.

Une ogive vieillissante peut exploser avec une puissance réduite, mais les documents du programme de surveillance des arsenaux américains montrent que la partie nucléaire des armes américaines peut être maintenue longtemps sans essais nucléaires : une étude de 1996 a révélé que, sur 830 défauts détectés dans les armes entreposées entre 1958 et 1993, moins de un pour cent ont été découverts lors d'essais nucléaires. Après 1970, 11 tests seulement sur 387 visaient à examiner la fiabilité des arsenaux. À un sénateur américain qui s'inquiétait des conséquences éventuelles d'une interdiction des essais, le directeur des

Les buts et les inconvénients du programme américain d'essais nucléaires virtuels

Pour mener à bien leurs essais nucléaires virtuels, les États-Unis comptent sur des superordinateurs puissants, sur la participation de la recherche civile et sur des expériences sur la fusion. Les organisateurs du programme prétendent que des capacités de simulation de pointe sont

indispensables pour le maintien de la sécurité et de la fiabilité des armes nucléaires américaines. Cependant le programme actuel est bien plus audacieux, et il débouchera sur la conception d'armes nouvelles plutôt que sur la maintenance des arsenaux existants.

But annoncé du programme d'intendance :
Garantir la sûreté et la fiabilité des armes nucléaires.

Inconvénient :
Sape les efforts américains en faveur du désarmement nucléaire.

Superordinateurs

Objectif : Mettre au point les superordinateurs les plus rapides du monde et les programmes de simulation des explosions nucléaires.

Inconvénient : Les capacités actuelles de simulation sont suffisantes pour maintenir ou refabriquer les armes nucléaires existantes.

Recherche civile

Objectif : Étude informatique de systèmes analogues aux explosions nucléaires (moteurs de fusées, supernovae...) et utilisation de ces modèles dans des simulations d'armes.

Inconvénient : La dissémination des informations sur les réactions nucléaires nuit à la sécurité globale.

Expériences sur la fusion

Objectif : Étudier les réactions de fusion en laboratoire pour vérifier les simulations informatiques.

Inconvénient : La fusion n'a jamais été réalisée en laboratoire, et les armes peuvent être entretenues par des techniques plus simples et moins coûteuses.

Jared Schneidman/Desiz

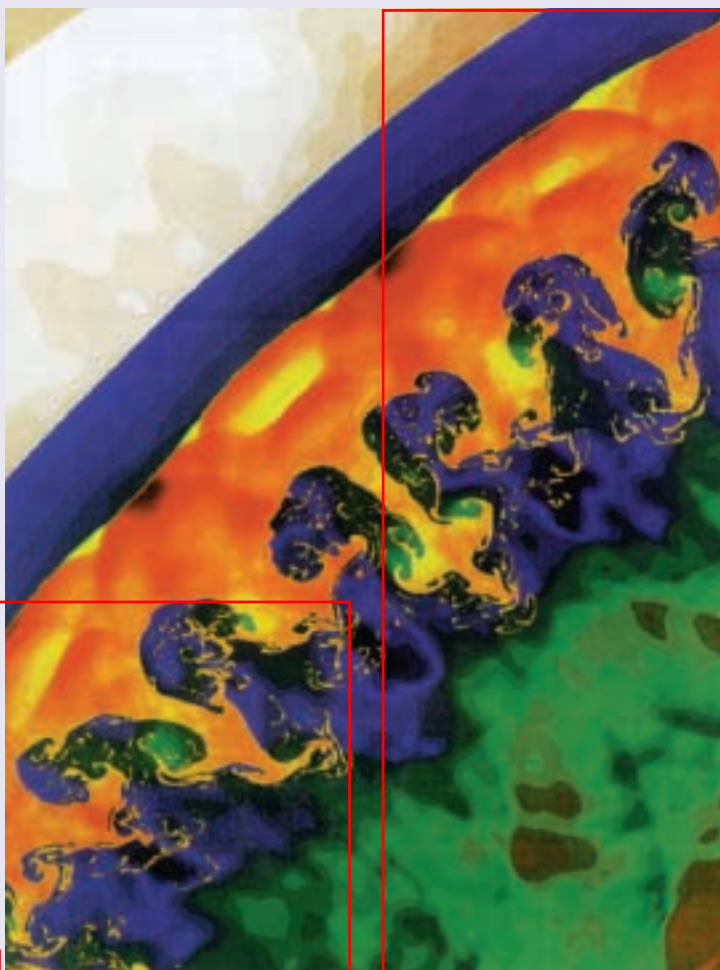
Le programme français de simulation

Les positions des chefs de l'État français sont claires et identiques : François Mitterrand voulait «développer et obtenir une simulation complète, qui permettra la mise au point des armes dont nous aurons besoin à l'horizon 2010, sans nouveaux essais nucléaires» ; pour Jacques Chirac, «nous disposons maintenant de tous les éléments pour relever le grand défi technologique de la simulation. Nous nous en donnerons les moyens».

En charge du programme de simulation, la Direction des applications militaires du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) a analysé les moyens d'assurer la continuité de la capacité scientifique et technique à garantir la fiabilité et la sûreté des armes nucléaires : «Cette garantie est apportée par des équipes qui ont acquis une maîtrise de l'ensemble des problèmes liés au fonctionnement d'une arme et qui se sont forgés une expérience à travers la réalisation des essais nucléaires passés. Leur connaissance est en partie empirique, notamment dans le domaine du thermonucléaire, qui n'a jamais pu faire l'objet d'expérimentations en laboratoire. Ces scientifiques chevronnés vont progressivement partir à la retraite et être remplacés. Le programme Simulation vise avant tout à donner aux nouvelles équipes, qui ne pourront pas recourir aux essais en vraie grandeur, des outils leur permettant de maîtriser tous les domaines de fonctionnement d'un engin nucléaire.»

Ce programme comporte trois volets : des études de physique de base, donnant une compréhension et une modélisation de chaque phénomène physique élémentaire intervenant dans le fonctionnement des armes ; la simulation numérique ; la validation expérimentale, fondée sur l'exploitation des résultats nucléaires passés et de deux grands outils expérimentaux (la machine radiographique AIRIX et le laser *Mégajoule*).

Daniel Verwaerde, qui dirige le programme Simulation du CEA, rejoint l'analyse de ses collègues américains, en ce qui concerne l'insuffisance des ordinateurs actuels pour atteindre l'objectif de la simulation ou, encore, pour



l'analyse des phénomènes physiques qui seront étudiés grâce au laser *Mégajoule*. Notamment, on devra modéliser de façon moins fruste qu'aujourd'hui les instabilités hydrodynamiques : celles-ci peuvent se développer dans la capsule de matière plastique de la cible laser (contenant le mélange fusible de deutérium et de tritium) lorsqu'elle est éclairée par les rayons X. Non maîtrisé, ce phénomène générerait la fusion, qui est d'autant plus importante que le mélange fusible est comprimé de façon plus homogène. Lors de l'expérience, les irrégularités initiales de la capsule conduiraient à un mélange hétérogène (voir la photographie ci-contre) du polymère vaporisé avec le mélange fusible ; cette dilution bloque la fusion. Pour bien comprendre les instabilités hydrodynamiques, il

faut des puissances 100 à 1 000 fois supérieures à celles des plus gros ordinateurs actuels. De même, pour comprendre les mécanismes des réactions entre le deutérium et le tritium, une puissance de calcul bien supérieure aux puissances actuelles est nécessaire.

Combien le programme Simulation coûtera-t-il ? D. Verwaerde indique d'abord que le budget français affecté à la dissuasion nucléaire a été réduit depuis 1990. Il coûte moins cher que le programme américain, parce que la France ne possède qu'un seul grand laboratoire «armes nucléaires», la Direction des applications militaires du CEA, alors que les États-Unis en ont trois. De surcroît, la France a choisi une «juste suffisance» des moyens pour la simulation, alors que les États-Unis explorent simultanément plusieurs pistes. Enfin, la France se propose d'utiliser davantage la recherche civile existante, notamment grâce aux accords de coopération signés entre le CEA et les universités. D. Verwaerde ne craint pas que les collaborations puissent engendrer une prolifération nucléaire, car les sciences fondamentales sont, de toute façon, largement partagées par la communauté internationale : «Ce qui empêche un pays proliférant de construire des armes, c'est l'accès à la matière et la possession d'une "bibliothèque d'essais" en vraie grandeur.»

Laboratoires *Sandia* a avoué que «seule une faible proportion des essais nucléaires effectués a servi à évaluer l'état des arsenaux, parce qu'on dispose de bien d'autres moyens d'effectuer ces évaluations».

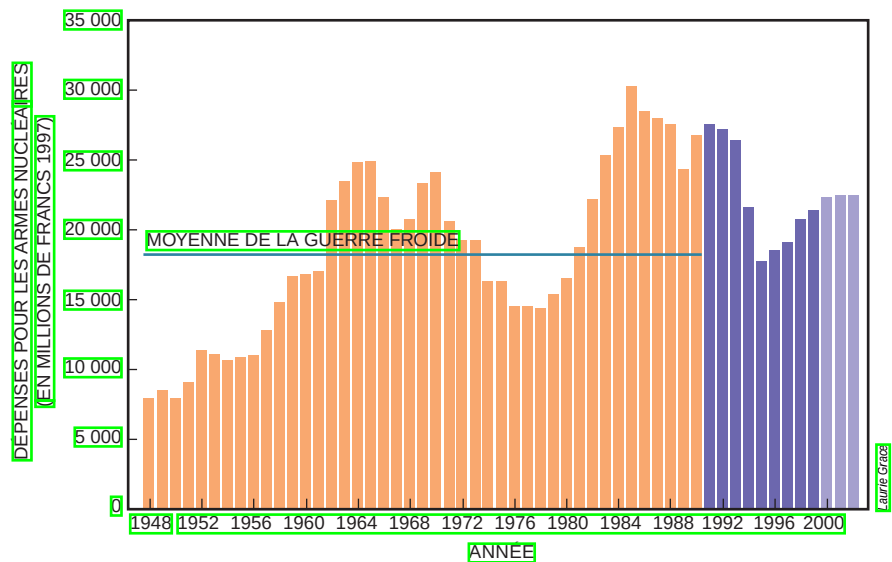
Les explosions souterraines servant peu à la détection des armes vieillissantes, le programme de surveillance n'a clairement pas pour but la maintenance des arsenaux nucléaires. On doit donc conclure que les simulations numériques et les expériences de laboratoire ne servent qu'à accroître les capacités américaines de conception d'armes nucléaires. Pis encore, le perfectionnement des simulations est inutile, puisque les États-Unis ont déjà les compétences techniques pour fabriquer de nouveaux missiles ou de nouvelles bombes, en utilisant les dispositifs nucléaires déjà validés. Les ingénieurs militaires pourraient améliorer les radars, les altimètres, les systèmes de propulsion, les générateurs de neutrons, les détonateurs, les batteries, les circuits intégrés et les autres composants des armes sans changer la partie nucléaire proprement dite.

Les partisans du projet américain d'essais virtuels prétendent également qu'ils ont besoin de calculer le moment où les performances des armes vieillissantes seront dégradées, en raison de la désintégration radioactive des matériaux des ogives ou d'autres processus. Les calculs serviraient à optimiser les calendriers de fabrication de nouvelles ogives, évitant des investissements excessifs dans la production d'ogives (à l'époque des essais souterrains, le problème du remplacement des stocks ne se posait pas : les nouvelles armes remplaçaient les modèles plus anciens).

Toutefois, pour conserver les armes en bon état, on n'a pas besoin de connaître le moment précis où les dégradations sont excessives ; on peut aussi inspecter les armes afin de savoir quand les détériorations semblent nuire aux performances. Un programme de détection, plutôt que de prévision, conduirait à un calendrier de remplacement très admissible, à un coût bien inférieur à celui du programme d'essais virtuels.

Des priorités différentes

Pourquoi la défense américaine accepte-t-elle les risques de prolifération posés par le programme de surveillance ? En priorité, un plan efficace d'intendance des arsenaux devrait



3. LE BUDGET ANNUEL du programme américain de surveillance des arsenaux nucléaires atteint 27 milliards de francs. Il est supérieur au financement qui était accordé aux armes nucléaires, pendant la guerre froide.

envisager les problèmes qui surviendraient après le départ des spécialistes des armes nucléaires. Un seul plan de ce type a été examiné : il envisageait de former une nouvelle génération de concepteurs d'armes en mettant à sa disposition des infrastructures expérimentales et des superordinateurs performants pour créer les explosions expérimentales virtuelles. Autrement dit, on aurait perpétué à grands frais des armuriers plutôt que des armes.

Il serait plus avisé, politiquement et techniquement, de reconnaître que le jugement des spécialistes d'armes nucléaires ne doit pas, ne devrait pas et ne peut probablement pas être formé sans des essais expérimentaux. Si l'on ne modifie pas les armes nucléaires, on n'aura pas à tester les nouveaux modèles. Dans cette hypothèse souhaitable, les personnels existants devraient utiliser leurs compétences pour valider les procédures de fabrication des armes qui

remplaceront les systèmes vieillissants. Une analyse attentive fait inévitablement conclure qu'un programme américain de surveillance des arsenaux plus concis, plus limité techniquement et focalisé sur le remplacement des armes actuelles garantirait mieux la défense des États-Unis tout en servant mieux les objectifs de non-prolifération nucléaire. Les contradictions du programme actuel d'essais virtuels semblent être la preuve d'une confusion considérable de la politique américaine de défense.

Dans les négociations internationales, les États-Unis prônent la non-prolifération et l'élimination de toutes les armes de destruction massive, mais ils cherchent, en fait, à conserver une suprématie nucléaire. Le gouvernement actuel et le Congrès n'ont pas pris un parti clair sur cette question qui, à l'approche des élections de l'an 2000, reste au centre d'un débat public vigoureux.

Christopher PAINE est directeur de recherche du Groupe «ressources naturelles» du Conseil américain de défense.

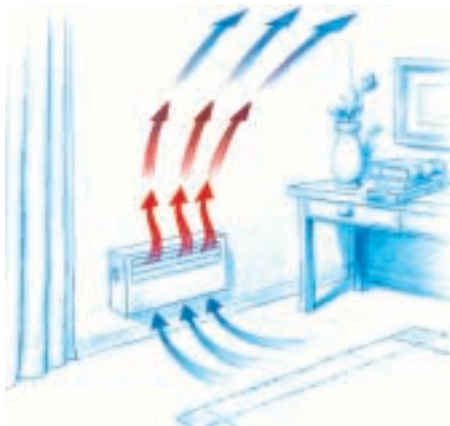
Richard L. GARWIN et Vadim A. SIMONENKO, *Nuclear Weapon Development without Nuclear Testing?*, document pour le Pugwash Workshop on Problems in Achieving a Nuclear-Weapon-Free World, 25-27 octobre 1996.

Christopher E. PAINE et Matthew G. MCKINZIE, *End Run : The U.S. Government's Plan for Designing Nuclear Weapons and Simulating Nuclear Explosions*

under the Comprehensive Test Ban, Natural Resources Defense Council, Nuclear Program, août 1997.

M.G. MCKINZIE, T.B. COCHRAN et C.E. PAINE, *Explosive Alliances : Nuclear Weapons Simulation Research at American Universities*, Natural Resources Defense Council, janvier 1998.

Sidney DRESS, Raymond JEANLOZ et Bob PEURIFOY, *Maintaining a Nuclear Deterrent under the Test Ban Treaty*, in *Science*, vol. 283, pp. 1119-1120, 19 février 1999.



Le fond de l'air effraie

ROLAND LEHOUCQ

La sensation de chaud et de froid dépend de la quantité de chaleur reçue et de la conductivité thermique des matériaux.

« Quelle chaleur ! Mets le ventilateur en route pour avoir un peu d'air frais. » Qui n'a fait cette remarque par une torride journée d'été. Mais pourquoi l'air serait-il plus frais sous prétexte qu'il est agité par les pales du ventilateur ? Avec un peu de mauvais esprit, on peut même affirmer que, le moteur du ventilateur chauffant pendant son fonctionnement, la température de l'air de la pièce augmente légèrement. Pourquoi alors ressentons-nous un courant d'air frais ?

Au sortir d'une douche, une sensation de froid nous étreint. Pourtant l'eau était chaude et la température de la pièce est identique à celle qui régnait au moment où, nu comme un ver, nous sommes entrés dans la douche sans ressentir de fraîcheur particulière.

Le contact avec le plateau de bois du bureau semble plus chaud que celui avec l'un de ses pieds métalliques. Pourtant, bois et métal, situés dans la même pièce, sont *a priori* à la même température.

Toutes ces situations paradoxales résultent de ce que la température ressentie diffère de la température ambiante. Qu'est ce alors que la température d'un corps et comment en ressentons-nous les différents échelons ?

La température du corps

La température interne du corps est de 37 °C et la température ambiante est, dans une atmosphère agréable, de 20 °C. La température de la peau prendra une valeur intermédiaire entre les deux extrêmes qui sera donc légèrement supérieure à la température ambiante (de l'ordre de 25 °C). La température diminue donc de l'intérieur du corps à sa surface, et la peau est surmontée d'une «couche limite» froide où la température rejoint

la température ambiante. C'est pour cette raison qu'après un certain temps, on supporte un bain à 50 °C, par exemple. Même s'il est un peu difficile de rentrer dans un tel bain, après quelques minutes d'immobilité, la fine couche qui surmonte la peau est à une température sensiblement inférieure à 50 °C et le bain ne paraît plus trop chaud. Évidemment, si l'on bouge, l'eau est mélangée et cet effet de couche disparaît.

La température possède deux propriétés importantes. Premièrement, contrairement au volume et à la masse, la température n'est pas une quantité additive : un volume d'eau à 50 °C versé dans un volume d'eau à 20 °C ne fait pas de l'eau à 70 °C. Deuxièmement, chacun sait que la température tend à s'uniformiser, car les zones les plus chaudes réchauffent les plus froides : il y a transfert thermique du chaud vers le froid. À l'aide de ces deux propriétés, on définit l'équilibre thermique d'un corps comme l'état où la température est constante et homogène. La température quantifie alors

l'agitation des atomes composant le corps à l'équilibre thermique : plus ils se déplacent rapidement plus le corps est chaud. À l'équilibre, la température mesure l'énergie cinétique moyenne des atomes du corps ; c'est donc une quantité macroscopique qui reflète la distribution microscopique des vitesses atomiques.

Comment augmenter la température d'un corps ? En lui apportant de l'énergie (on chauffe de l'eau en la plaçant sur du feu ou sur une plaque chauffante) ou du travail mécanique (la compression d'un gaz l'échauffe). Ainsi, en chauffant une barre métallique à l'une de ses extrémités, sa température s'élève de proche en proche sur toute sa longueur. C'est le phénomène de conduction thermique étudié par le mathématicien Joseph Fourier (1768-1830). Empiriquement, Fourier établit que le flux thermique, c'est-à-dire la quantité d'énergie qui passe chaque seconde d'une zone chaude à une autre plus froide, est proportionnel à la section de la barre et à la différence de température entre les deux zones. Le coefficient de proportionnalité, la conductivité thermique du milieu, est d'autant plus grand que le corps transmet efficacement la chaleur.

La conduction résulte de phénomènes microscopiques : à l'endroit chauffé, l'agitation thermique augmente et elle se transmet de proche en proche aux atomes



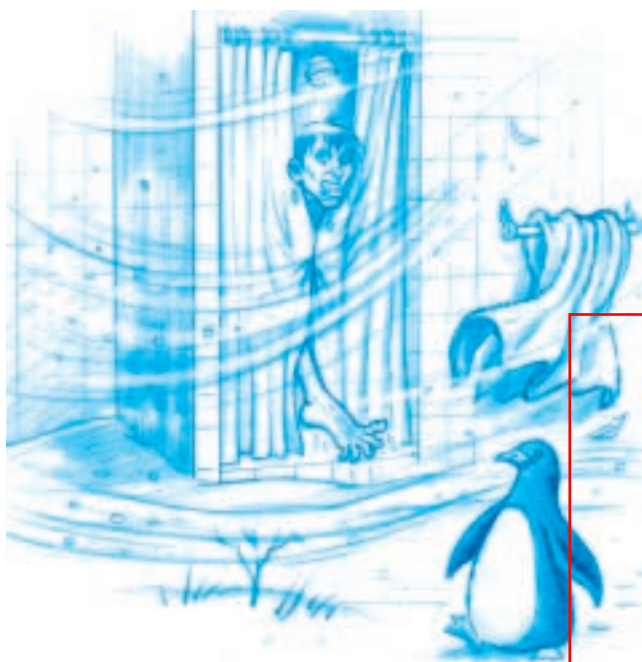
dessin de Bruno Labrecq

voisins (voir la figure page 100). Dans le cas des métaux, l'énergie cinétique des électrons libres est transmise par collision entre électrons (les mêmes électrons qui interviennent dans la conduction électrique). Si les métaux sont de bons conducteurs de chaleur et d'électricité, c'est que les électrons peuvent se répartir dans toute la structure cristalline du métal. À l'inverse, les solides non métalliques, comme le bois et le verre, sont de mauvais conducteurs parce que les électrons restent localisés aux voisinage des atomes et ne transmettent pas leur énergie par collision. La conductivité thermique des liquides et des gaz est plus faible, surtout pour les gaz : l'énergie cinétique s'y transmet d'autant moins bien que le milieu est peu dense et les collisions rares.

Quand on met en contact deux corps de natures et de températures différentes (la main sur une surface métallique par exemple) la température d'équilibre de l'interface de contact se rapprochera de celle du meilleur conducteur thermique. Ainsi, du bois à température ambiante (20 °C) nous paraît plus chaud que du métal à la même température. En effet, la main est un meilleur conducteur de chaleur que le bois et donc, la température de leur interface, qui est aussi celle qui sera ressentie, sera proche de celle de la surface de la main, soit environ 25 °C. À l'inverse, un métal est un bien meilleur conducteur thermique que la main et la température de leur interface sera proche de celle du métal (20 °C) : la chaleur de la main est absorbée plus vite par le métal qu'elle ne peut la fournir.

CONDUCTION ET CONVECTION

Outre ces mouvements de transmission de la chaleur de proche en proche, des mouvements d'ensemble transportent aussi la chaleur. En hiver, lorsque le vent souffle, nous ressentons un froid plus vif, car le transfert thermique par conduction est remplacé par un transfert



par convection, plus efficace. La convection transporte l'énergie thermique par des mouvements macroscopiques de matière, forcés (ventilateurs) ou naturels (mouvements atmosphériques) : la couche limite protectrice est constamment renouvelée.

Par exemple, l'air chaud au voisinage d'un radiateur d'une pièce est moins dense. Sous l'effet de la poussée d'Archimède, il s'élève et est remplacé par de l'air plus froid qui se réchauffera à son tour. Ce mouvement naturel d'air ascendant tend à uniformiser la température de la pièce (voir le cartouche). Des mouvements de convection analogues jouent un rôle considérable dans les phénomènes atmosphériques.

Le vent est un exemple de mouvement de convection forcé qui renforce les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur du corps. Quelle est, selon la vitesse du vent, la température ressentie par la peau nue, dont la température de surface est d'environ 25 °C? On cherche à quelle température «équivalente» doit être l'air ambiant supposé immobile pour que le flux d'énergie entre la peau et l'air soit égal à l'énergie emportée par le vent à la température réelle. L'écart entre la température ressentie et la température réelle est d'autant plus grand que l'écart entre la température réelle et celle de la

BIENFAISANTE ÉVAPORATION

peau est grand et que le vent est plus fort (que la convection est plus active). Par exemple, dans un vent à -10 °C soufflant à 30 kilomètres par heure, la température ressentie est de -18 °C (voir le tableau).

Dans le calcul précédent, l'air est supposé sec. Dans le cas d'un air humide, l'énergie prélevée au corps pour évaporer l'eau renforce la sensation de froid. On comprend ainsi mieux le rôle de la sueur qui, nécessitant une importante quantité d'énergie pour s'évaporer, joue un rôle essentiel dans la régulation thermique humaine (la chaleur de vaporisation de l'eau est de 2,26 kilojoules par gramme). Un courant d'air sur un visage en sueur donne une forte sensation de fraîcheur, car la convection forcée active l'évaporation (de même que le linge humide sèche plus rapidement quand il y a du vent). Pour mesurer cette activation, observons qu'un thermomètre dont l'extrémité est enveloppée d'un mouchoir en papier humide indique une température bien inférieure à celle du même thermomètre à l'air libre.

Finalement, notre confort thermique ne dépend pas de la température extérieure réelle, mais plutôt du flux thermique entre notre corps et l'air ambiant : la sensation de froid (chaud) est d'autant plus prononcée que le flux thermique sortant de (entrant dans) notre corps est important.

Lorsque vous vous brûlez la main, il est ainsi nécessaire d'évacuer la chaleur emmagasinée en passant la brûlure sous l'eau froide pendant plusieurs minutes. Pour évacuer la chaleur reçue par les grands brûlés, on a envisagé de plonger les victimes dans un bain d'eau à 15 °C circulant autour du corps. Les calculs montrent que, dans les cas les plus graves, la chaleur est évacuée qu'après plusieurs heures. En pratique, la difficulté est de maintenir la température corporelle proche de 37 °C afin d'éviter l'hypothermie.

TEMPÉRATURE AMBIANTE RÉELLE

	-15 °C	-10 °C	-5 °C	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C
5 KM/H	-18 °C	-10 °C	-7 °C	-2 °C	3 °C	9 °C	14 °C	19 °C	25 °C	31 °C	36 °C	41 °C
10 KM/H	-20 °C	-14 °C	-8 °C	-3 °C	2 °C	8 °C	13 °C	19 °C	25 °C	31 °C	37 °C	42 °C
30 KM/H	-24 °C	-18 °C	-12 °C	-6 °C	1 °C	7 °C	12 °C	18 °C	25 °C	32 °C	38 °C	43 °C
50 KM/H	-29 °C	-21 °C	-14 °C	-7 °C	0 °C	6 °C	12 °C	18 °C	25 °C	32 °C	38 °C	44 °C
70 KM/H	-35 °C	-24 °C	-15 °C	-8 °C	-1 °C	6 °C	12 °C	18 °C	25 °C	32 °C	38 °C	44 °C
90 KM/H	-41 °C	-30 °C	-19 °C	-9 °C	-2 °C	5 °C	12 °C	18 °C	25 °C	32 °C	38 °C	45 °C

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA.

S. OLIVIER et H. GIÉ, *Thermodynamique*, Lavoisier Tech & Doc, 1996.

H. WEINSTOCK, *Thermodynamics of cooling a live human body*, in *American Journal of Physics*, vol. 48, pp. 339, 1980.



Les sphéricônes

IAN STEWART

Un volume inédit amuse les mathématiciens.

Aujourd'hui, un cône, c'est plus souvent une crème glacée que la forme qui passionna les géomètres grecs dans l'Antiquité. Ils se délectaient de la subtile géométrie des sections coniques, à l'intersection d'un plan et d'un cône. Ils utilisaient ces ellipses, paraboles et hyperboles pour résoudre des problèmes inaccessibles «à la règle et au compas», dont les plus célèbres sont la trisection d'un angle et la construction d'un cube d'un volume double de celui d'un cube initial.

Ces deux problèmes se ramènent à la résolution d'une équation du troisième degré, c'est-à-dire que le plus grand exposant de l'inconnue est trois. Les sections coniques sont utiles dans la résolution de tels problèmes, car l'équation de l'intersection de deux d'entre elles est une

équation du troisième ou du quatrième degré, alors que les constructions avec une règle et un compas ne donnent accès qu'à des solutions d'équations du deuxième degré.

Le cône seul a moins intéressé les mathématiciens que ses intersections avec un plan, peut-être parce qu'il est très simple. Qu'espérer en dire de neuf? En mai 1999, un lecteur anglais de ces colonnes, C. Roberts, a démontré qu'un peu d'opiniâtreté n'est jamais déplacée : il s'est intéressé à une étrange forme proche du cône, qu'il a nommée sphéricône.

Le sphéricône s'obtient à partir de deux cônes dont l'angle au sommet est de 90 degrés. On les accole par leur base, puis on coupe ce double cône par un plan qui passe par l'axe commun : la section est un carré, puisque les angles au sommet sont droits. Comme un carré est invariant par une rotation de 90 degrés, une moitié du double cône, tournée de 90 degrés, s'ajuste parfaitement à l'autre moitié non tournée. Une fois les deux moitiés recollées, vous obtenez un sphéricône (voir la figure 1). La rotation d'une moitié en fait un animal mathématique que je n'avais encore jamais rencontré.

Le sphéricône s'obtient également par le pliage d'une feuille découpée suivant quatre secteurs identiques, juxtaposés tête-bêche (voir la figure 3). Pour quel angle des secteurs obtient-on le sphéricône? Prenons le problème à l'envers : partons d'un double cône. De profil, on voit un carré. Si le côté est égal à un, le théorème de Pythagore

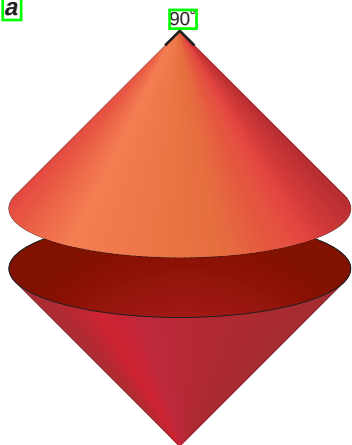
stipule que la diagonale, qui est aussi le diamètre des cônes, est égale à $\sqrt{2}$. La circonférence de la base des cônes est donc égale à $\pi\sqrt{2}$. Comme les arcs des secteurs représentent la moitié d'un cône, leur longueur est égale à $(\pi\sqrt{2})/2$. L'angle au centre de chaque secteur est alors égal à $(\pi\sqrt{2})/2$ radians, soit environ 127,28 degrés.

Avec un peu d'attention et quelques bouts de ruban adhésif, vous obtiendrez un magnifique sphéricône.

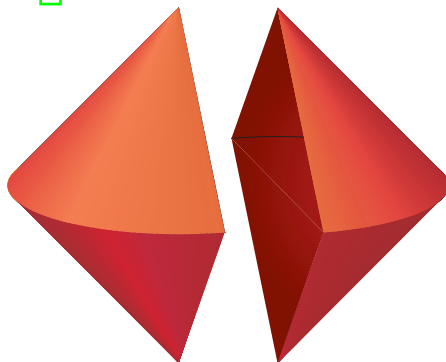
Vous aurez alors le plaisir de voir le sphéricône rouler! Sur un plan, un cône roule en décrivant un cercle. Un double cône, lui, décrit soit des cercles différents selon le cône d'appui, soit une ligne droite lorsqu'il est en équilibre sur la frontière des deux cônes ou qu'il est guidé par des rails. Un sphéricône, enfin, décrit une ligne sinueuse autour d'une droite : il suit exactement le patron de construction de la figure 2, où les sommets des secteurs correspondent aux points de contact des sommets de la section carrée, tandis que les secteurs correspondent au balayage de la zone de contact. Sur une pente douce, le sphéricône se dodeline de gauche à droite avec une démarche chaloupée. N'hésitez plus à construire le sphéricône et observez-le rouler sur une table.

La lettre de C. Roberts mentionnait également quelques propriétés fascinantes, telles que la présence d'une face continue ou la possibilité pour deux sphéricônes identiques de rouler indéfiniment l'un sur

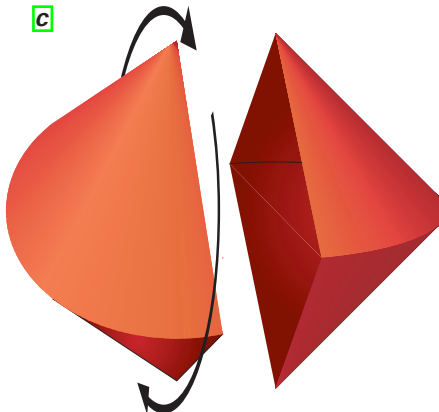
a



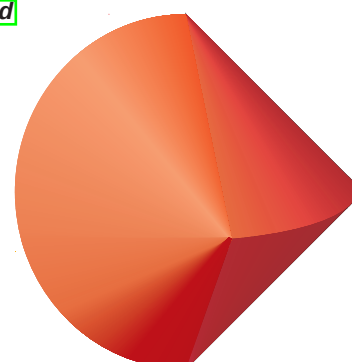
b



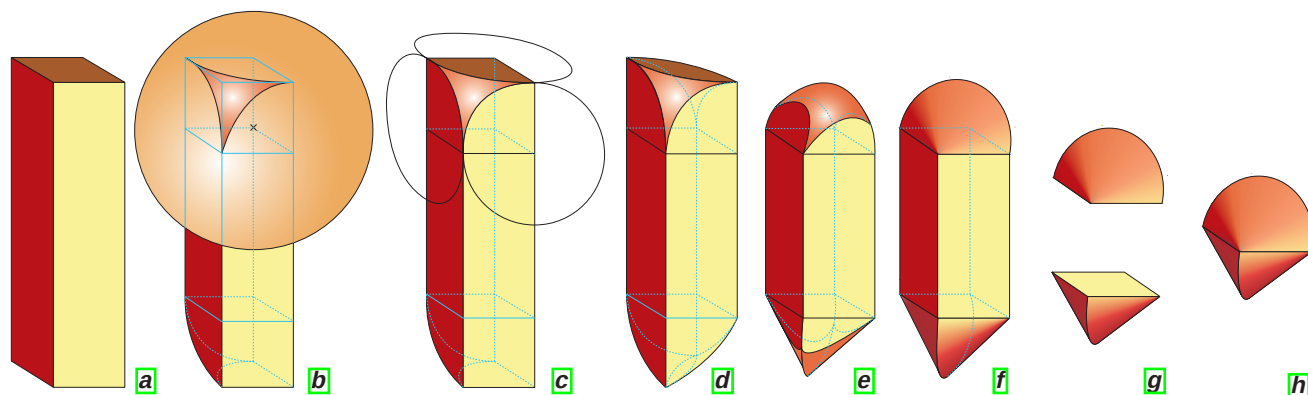
c



d



1. LA CONSTRUCTION D'UN SPHERICÔNE : collez deux cônes identiques, d'angle au sommet égal à 90 degrés, par leurs bases (a) ; coupez selon le plan de l'axe des deux cônes (b) ; pivotez l'une des moitiés de 90 degrés (c) ; enfin, recolliez les deux parties (d).



2. A partir d'une longueur de bois à section carrée (a), on peut fabriquer un sphéricône : à chaque extrémité, on taille un coin selon l'intersection avec une sphère (b et c) ; on taille ensuite les deux coins opposés aux précédents (d) ; puis on arrondit les

quatre coins restés intacts jusqu'à obtenir, à chaque extrémité de la pièce de bois, un demi-cercle qui joint deux sommets opposés de la section carrée (e et f) ; on élimine alors le bois central (g) et on colle les deux morceaux.

l'autre. Intrigué, je questionnai ce lecteur qui, en guise de réponse, m'expédia une énorme boîte en carton d'une légèreté surprenante : elle contenait un réseau d'environ 50 sphéricônes soigneusement assemblés. Ce réseau est régulier : sa structure peut se répéter indéfiniment dans les trois dimensions de l'espace.

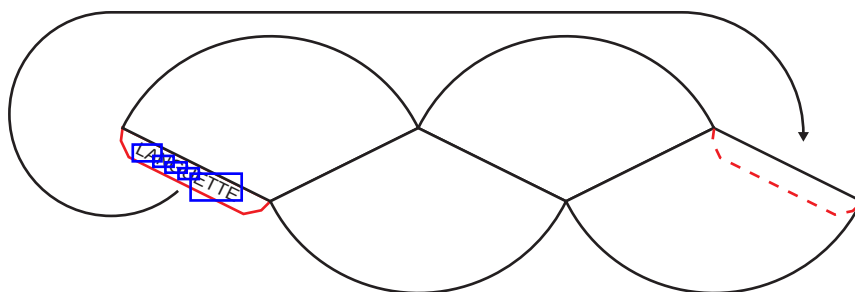
Les remarquables propriétés du sphéricône résultent de la possibilité de l'inscrire dans un réseau cubique : ses quatre arêtes – qui séparent les quatre secteurs – appartiennent à un octaèdre régulier (les quatre autres sont les bissectrices de chaque secteur), dont les sommets sont les centres des six faces d'un cube.

Agé de 47 ans, C. Roberts a inventé le sphéricône il y a 30 ans. Devenu menuisier, il a taillé son premier sphéricône dans du bois. Le ruban de Möbius, formé d'un ruban de papier dont on colle les deux extrémités après avoir tourné l'une d'elles de 180 degrés, est à l'origine de l'idée du sphéricône. Quelle que soit sa finesse, le papier a une épaisseur : une section transverse du ruban est donc un rectangle allongé. Avec une section carrée, les extrémités pourront être collées après une rotation de seulement 90 degrés : le volume ainsi obtenu est un anneau qui a une seule face. Existait-il un volume sans trou et dont la surface soit une unique face ? Alors qu'il travaillait une longueur de bois à section carrée, C. Roberts a cherché à relier sans arête l'extrémité de deux des faces rectangulaires adjacentes. La même opération pour les deux autres faces rectangulaires permet d'obtenir un demi-cercle qui joint les extrémités d'une diagonale de la section carrée (voir la figure 2f). Le passage d'une face rectangulaire à l'autre rappelle les virages relevés des vélodromes. Après avoir répété le même procédé à l'autre extrémité de la pièce de bois en suivant une diagonale perpendiculaire à la précédente,

l'élimination du bois superflu entre les deux extrémités donne naissance à un... sphéricône (voir la figure 2h).

Il en a taillé un dans du bois d'acajou (*Swietenia mahagoni*), et il l'a offert à sa sœur, qui l'a encore. Le volume disparut de sa mémoire jusqu'en 1997, où il m'a vu donner des conférences télévisées sur la symétrie.

Mentionnons, pour terminer, que deux sphéricônes peuvent rouler l'un sur l'autre ; quatre sphéricônes arrangés en carré peuvent également rouler les uns sur les autres ; huit sphéricônes peuvent parcourir un neuvième sphéricône placé au centre... Les combinaisons semblent infinies, je laisse le soin au lecteur d'en explorer les possibilités.



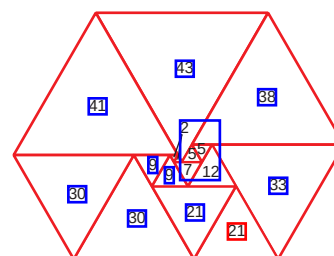
3. LA CONSTRUCTION du sphéricône est facile quand on suit ce patron. Après avoir découpé cette forme (agrandie !) dans du carton, on colle la languette et on joint les bords des demi-cônes.

Réactions

La correspondance qui a suivi l'article «La quadrature du carré» (voir *Pour la Science*, octobre 1997) n'est pas encore terminée. Par exemple, Robert Wainwright demande quelle est la plus grande aire convexe, c'est-à-dire sans angle rentrant, qui peut être pavée par des triangles équilatéraux à côtés entiers sans diviseurs communs. D'autres lettres annoncent vos résultats, notamment des pavages d'aire égale à 4 751 (celle du plus petit triangle possible est égale à l'unité), puis à 4 782 par 15 triangles.

En 1998, par inadvertance, j'ai négligé le pavage par 15 triangles d'une aire égale à 5 114, proposé par John Layman, de l'Institut polytechnique de Virginie, plus grand que tous ceux que j'avais repro-

duits ! (Je lui présente ici mes excuses. Je dois sans doute améliorer mon système de classement.) Plus récemment, J. Layman a trouvé un pavage d'aire 9 158 avec 16 triangles (voir la figure, les chiffres indiquent la longueur d'un côté), un d'aire 16 655 avec 17 triangles et un d'aire 29 214 avec 18 triangles.





Les propositions indécidables

JEAN-PAUL DELAHAYE

L'incomplétude gödelienne concerne-t-elle d'autres domaines que les mathématiques ?

En 1931, le logicien Kurt Gödel prouvait un théorème révolutionnaire qui démontrait que les mathématiques sont plus profondes que les mathématiciens ne l'imaginaient. Toute tentative pour définir de qu'est une preuve échoue nécessairement à cause des propositions dites indécidables (on ne peut déterminer ni leur vérité, ni leur fausseté) qui se glissent dans tout système.

Imaginez l'émoi que ce résultat aurait dû susciter : assez paradoxalement toutefois, l'incomplétude et l'indécidabilité gödelienne engendrent un intérêt considérable chez nombre de ceux qu'elles ne concernent pas vraiment (ou seulement à titre de vagues métaphores) et une indifférence aveugle chez les mathématiciens, qui devraient en être troublés. Nous allons examiner le théorème de Gödel et l'importance qu'il devrait avoir.

L'AXIOME DES PARALLÈLES

L'exemple le plus simple d'une situation d'incomplétude et d'indécidabilité est ancienne : c'est la géométrie qui découle de l'axiome des parallèles. L'affaire remonte aux *Éléments* d'Euclide, qui furent écrits vers 300 avant J.-C. et qui rapportaient des résultats mathématiques plus anciens encore. Euclide y développe une conception axiomatique de la géométrie : il énumère les propriétés primitives des objets points, droites, plans, etc., qu'il accepte sans démonstration (ce sont les axiomes et postulats). Toute la géométrie n'est plus alors qu'une question de raisonnement pur, de déduction logique.

La présentation d'Euclide ne décrit pas les règles de raisonnement autorisées (elles n'ont été comprises qu'au

cours du XIX^e siècle). Euclide ignore les notations qui, aujourd'hui, facilitent l'exposé des démonstrations et leurs vérifications ; pour rendre plus aisée la lecture, l'axiomatisation de la géométrie que nous évoquons ici prend en compte les progrès faits par la méthode axiomatique.

Parmi les propriétés posées par Euclide, la pierre d'achoppement est l'axiome des parallèles (ou cinquième postulat d'Euclide), qui énonce :

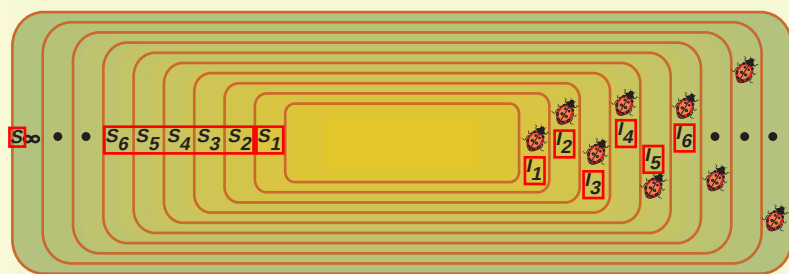
Si P est un point donné et si D est une droite ne contenant pas P, alors dans le plan déterminé par P et D il existe une droite unique D' contenant P et ne rencontrant pas D (la droite D' est dénommée la parallèle à D passant par P).

La question s'est posée très tôt : pouvait-on déduire cet axiome des autres axiomes, en apparence plus naturels ? On a longtemps pensé que cela devait être possible. Hélas, toutes les tentatives échouèrent pour prouver l'axiome des parallèles à partir des autres axiomes. Avec la maturité des méthodes logiques, on a fini par démontrer en 1868 que l'énoncé des parallèles ne se déduisait pas des autres axiomes : aujourd'hui, il est donc inutile d'essayer de le «prouver»!

Il s'agit bien là d'une situation d'incomplétude et d'indécidabilité : la géométrie euclidienne sans l'axiome des parallèles, dénommée *géométrie absolue*, est incomplète. Quelle que soit la longueur des raisonnements qu'on fasse, on ne peut déduire de la géométrie absolue, ni l'axiome des parallèles ni sa négation (c'est-à-dire l'affirmation qu'il n'est pas vérifié). Vis-à-vis de la géométrie absolue, l'axiome des parallèles est indécidable.

Même si la preuve de cette indécidabilité a joué un rôle important dans la compréhension de la nature de l'espace physique, la conclusion qu'on en tire n'est pas très grave sur le plan mathématique. On la formule ainsi : la géométrie absolue n'est pas la théorie de l'espace, car la géométrie absolue n'est que le socle

1. ON N'ÉCHAPPE PAS AU THÉOREME DE GÖDEL



Si un système formel permet de faire de l'arithmétique et qu'il est consistant (c'est-à-dire qu'il ne se contredit pas), alors il existe des énoncés *I* dont *S* ne peut démontrer ni qu'ils sont vrais, ni qu'ils sont faux (on les appelle des indécidables de *S*).

Le théorème de Gödel permet de construire explicitement un tel indécidable *I* (sa démonstration est fondée sur l'écriture d'un énoncé codant dans *S* l'affirmation : "je ne suis pas démontrable dans *S*").

Une idée naturelle vient à l'esprit : partant d'un système *S*₁, on construit un tel indécidable *I*₁ et on l'ajoute à *S*₁ comme nouvel axiome, ce qui donne un nouveau système *S*₂ dans lequel bien sûr *I*₁ n'est plus indécidable.

Puisque le théorème de Gödel appliqué à *S*₂ nous permet d'obtenir un autre indécidable *I*₂ on l'ajoute aux axiomes de *S*₂, ce qui conduit à un nouveau système *S*₃. Etc.

Les systèmes emboîtés *S*₁, *S*₂, *S*₃, etc., sont de plus en plus puissants (ils comportent de moins en moins d'indécidables). À l'infini, ils fournissent un nouveau système formel *S*_∞. Malheureusement, ce système comporte encore des indécidables ! On n'échappe pas si facilement au théorème de Gödel.

commun à plusieurs géométries possibles que l'on définit en ajoutant à la géométrie absolue, soit l'axiome des parallèles, soit un autre axiome. Parmi les différentes géométries possibles obtenues en complétant la géométrie absolue, c'est aux physiciens de dire celle qui leur convient le mieux pour représenter l'espace.

Etre incomplet, pour un système formel (comme celui de la géométrie euclidienne), c'est laisser certaines propositions en suspens : un système incomplet est un système où l'on ne peut prouver ni la vérité ni la fausseté d'énoncés qu'il permet pourtant de formuler. Un indécidable d'un système incomplet, c'est un énoncé pour lequel le système ne sait rien dire.

L'incomplétude de la géométrie absolue traduit simplement un oubli dans les axiomes : depuis des siècles, de nombreux mathématiciens croyaient que l'axiome des parallèles pouvait se déduire des autres, ils se trompaient. En voilà une affaire !

Bien des problèmes restent ouverts concernant l'indécidabilité de problèmes simples, y compris lorsqu'ils ont été résolus dans un cadre particulier. Par exemple, la démonstration du grand théorème de Fermat par Andrew Wiles en 1994 s'est faite dans le cadre de la théorie des ensembles – ce théorème n'est pas un indécidable de la théorie des ensembles, mais savoir s'il s'agit d'un indécidable de l'arithmétique est une question difficile et non résolue dont nous verrons la pertinence.

EN ATTENDANT GÖDEL...

Les phénomènes d'indécidabilité et d'incomplétude (même si, dans le passé, les mathématiciens n'utilisaient pas ces termes) sont présents dans les mathématiques depuis toujours. Ce qui a changé en 1931, avec les fameux résultats de Kurt Gödel, c'est qu'il est aujourd'hui prouvé que ces phénomènes – contrairement à ce qu'on pensait – sont universels : toute théorie d'un certain niveau y est assujettie. D'aucuns ont cru déduire de cette universalité que l'indécidabilité était inquiétante. D'autres, sans contester la justesse des résultats de Gödel, soutiennent à l'opposé qu'on ne doit pas s'en préoccuper, et donc, en quelque sorte, que la situation des mathématiques est désespérée, mais pas grave.

Un exemple simplissime de système formel est indiqué dans l'encadré 3. Les logiciens affirment qu'un système formel est consistant (ou cohérent, ou non contradictoire) quand il est impossible d'y démontrer une proposition et sa négation (autrement dit, le système ne se contredit pas). Dans le

2. L'AXIOME DES PARALLÈLES EST INDECIDABLE

Si P est un point donné et si D est une droite ne contenant pas P , alors dans le plan déterminé par P et D il existe une droite unique D' , contenant P et ne rencontrant pas D .

Cette formulation de l'axiome des parallèles n'est pas exactement celle d'Euclide. Il utilisait l'énoncé équivalent : si deux droites, coupées par une sécante, forment des angles intérieurs d'un même côté dont la somme est inférieure à deux droits, ces droites se coupent.

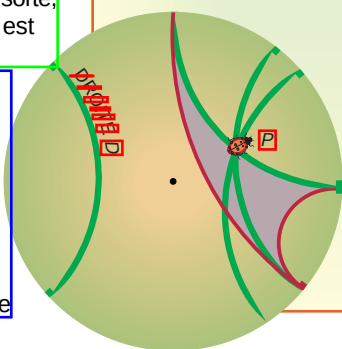
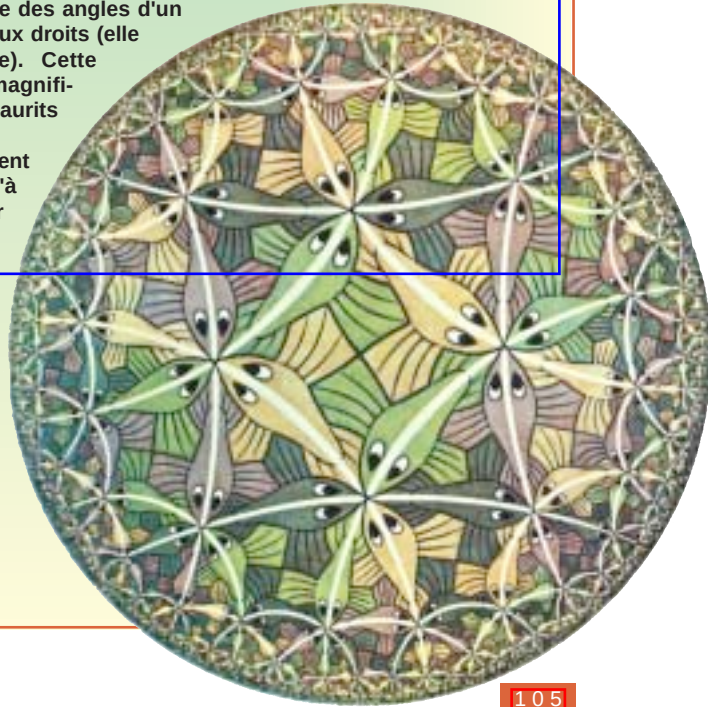
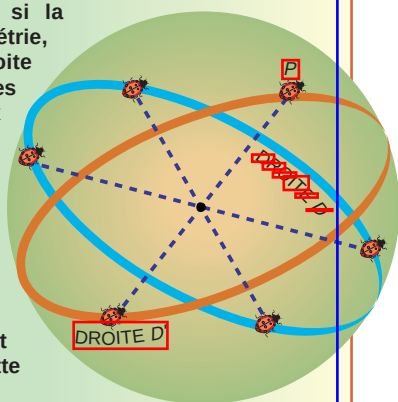
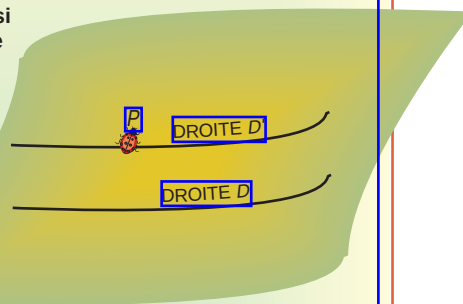
D'autres formulations équivalentes sont : si une droite D coupe une droite, elle coupe aussi toutes les droites parallèles à D (axiome de Proclus) ; la somme des angles d'un triangle vaut deux droits ; la surface d'un triangle peut être aussi grande qu'on veut. La terminologie du *cinquième postulat d'Euclide* ou *postulat des parallèles*, est trompeuse, car chez Euclide certaines définitions cachent des axiomes.

Dans la présentation moderne de l'axiomatisation de la géométrie – étudiée par David Hilbert –, il y a bien plus de cinq postulats-axiomes fondamentaux.

La première démonstration que l'axiome des parallèles est indécidable dans la géométrie absolue est due à Eugenio Beltrami en 1868. Il prouva que la géométrie elliptique (ou de Riemann) est consistante si la géométrie euclidienne l'est. Dans cette géométrie, par un point ne passe pas forcément de droite parallèle à une droite donnée, et la somme des angles d'un triangle est supérieure à deux droits. Il appelle point un couple de points diamétralement opposés et droite un cercle sur la sphère de diamètre maximum. Avec ce vocabulaire redéfini, **il constate que** les axiomes de la géométrie sont vérifiés. Par exemple : par deux points (au sens nouveau) distincts passe une droite (au sens nouveau) unique. Le seul axiome qui n'est pas satisfait est celui des parallèles : une droite D étant donnée, ainsi qu'un point P à l'extérieur de cette droite, toute droite D' passant par P coupe D .

Une autre version de la démonstration de l'impossibilité de déduire l'axiome des parallèles des autres axiomes est due au grand mathématicien français Henri Poincaré. On prend un disque (sans sa circonférence) et on appelle droite les arcs de cercle situés dans ce disque qui coupent orthogonalement le bord du disque. Dans cette géométrie hyperbolique (ou de Lobachevski), par un point donné passent plusieurs droites parallèles à une droite donnée, et la somme des angles d'un triangle est inférieure à deux droits (elle est éventuellement nulle). Cette géométrie a inspiré de magnifiques œuvres au graveur Maurits Escher.

Les mathématiciens utilisent aujourd'hui des dessins "à la Escher" pour visualiser les propriétés de la géométrie hyperbolique.



cadre de la logique usuelle, dès qu'un système peut démontrer P et non- P (une proposition et sa négation), alors il peut tout démontrer. C'est pourquoi l'insistance est crainte et bannie.

Le résultat de Kurt Gödel de 1931, qui universalise l'incomplétude déjà connue pour la géométrie absolue, se décompose en deux parties. La première indique que tout système formel permettant de faire de l'arithmétique (la théorie élémentaire des nombres entiers) est soit inconsistent (donc inintéressant, puisque tout y est vrai et faux à la fois), soit incomplet (donc insatisfaisant, puisque le système laisse en suspens certains énoncés).

Autrement dit : tout système formel, à la fois assez puissant pour l'arithmétique élémentaire et consistant contient des indécidables. La seconde partie des résultats de 1931 (ou second théorème de Gödel) indique que justement l'énoncé qui affirme qu'un système est consistant est l'un des indécidables de ce système, ce que l'on traduit simplement en disant qu'un système consistant ne peut savoir qu'il l'est. Une démonstration de ce théorème due à Georges Boolos est présentée sur le site Internet de *Pour la Science*.

Insistons sur le fait que ces résultats n'indiquent pas qu'il existe des

indécidables absolus (c'est-à-dire définitivement indémonstrables dans tout système formel), mais indique que, pour chaque système formel particulier (assez puissant et consistant), il y a au moins un indécidable I .

Si vous repérez un indécidable pour un système S auquel vous ajoutez le nouvel axiome I , vous créez un système S' où I n'est plus indécidable. Fort bien, mais avez-vous par là véritablement progressé ? Hélas, guère : le théorème de Gödel s'applique alors au nouveau système S' , et donc il existe au moins un indécidable I' de S' (I' est bien sûr aussi un indécidable de S). Si vous ajoutez I' aux axiomes de S' , vous obtenez un système S'' qui contiendra un indécidable I'' , etc.

Ceux qui interprètent le phénomène de l'indécidabilité comme établissant que les mathématiques sont incomplètes se trompent : un système particulier qui n'accède pas à une certaine vérité mathématique peut toujours être complété pour y accéder.

Un piège existe, piège que nous allons détailler pour assimiler le sens du théorème de Gödel. Le mathématicien n'est jamais effrayé par l'infini et, devant les systèmes S , S' , S'' , etc., il se dit qu'il suffit d'ajouter jusqu'à l'infini les indécidables qu'on trouve et qu'on obtiendra alors un système complet.

UNE MÉTHODE DE COMPLÉTION INEFFECTIVE

Si ce mathématicien s'y prend trop naïvement, il ne réussira pas car, même après avoir ajouté I , I' , I'' , etc. jusqu'à l'infini, le système obtenu contiendra encore des indécidables (on sait le démontrer). L'impossibilité est analogue avec les tentatives d'énumération des nombres entiers : ce n'est pas parce que vous prenez une infinité d'entiers (par exemple, les entiers pairs, 2, 4, 6, 8, ...) que vous prenez tous les entiers. Similairement, ce n'est pas parce que vous ajoutez une infinité d'indécidables à S qu'il n'y en n'a plus.

Après un moment de réflexion, le mathématicien propose une autre idée un peu plus subtile. Il dit :

– Je numérote toutes les formules ayant un sens dans mon système $S = S_0 : f_0, f_1, f_2, f_3, f_4, \dots$ (une telle numérotation est possible pour des formules).

– Je les prends une à une en ajoutant comme nouveaux axiomes celles qui sont encore indécidables au moment où je les considère : à l'étape n du processus de complétion, j'arrive à un certain système S_n , je regarde f_n ; si c'est un indécidable de S_n , j'ajoute f_n à S_n pour obtenir S_{n+1} , sinon je conserve le même $S_n : S_{n+1} = S_n$.

3. UN EXEMPLE DE SYSTÈME FORMEL

Dans un système formel (ou système de démonstrations), on détaille successivement ce que sont les formules, les axiomes, les règles d'inférence. Examinons un exemple de système formel, dont la signification sera donnée par la suite.

Formules : des bâtons | suivis du symbole $\clubsuit$, puis à nouveau des bâtons, puis le symbole $=$, puis encore des bâtons, ou la même chose précédée de un ou plusieurs NON.

Exemples : $||||| \clubsuit ||||| = |||||$; NON $||||| \clubsuit ||||| = |||||$

Axiomes : Toutes les formules sans NON où le nombre de bâtons des trois paquets est le même.

Exemple : $||||| \clubsuit ||||| = |||||$

Règles d'inférence :

– **règle A** : on permute les deux paquets devant le $=$.

Exemple : de $||||| \clubsuit || = |||$, on déduit $|| \clubsuit ||||| = |||$

– **règle B** : on ajoute au paquet entre $\clubsuit$ et $=$ le nombre de bâtons qu'il y a dans le paquet à gauche de $\clubsuit$.

Exemple : de $||| \clubsuit || = |||$, on déduit $||| \clubsuit ||||| = |||$

– **règle C** : on ajoute ou on soustrait au moins un des bâtons du paquet derrière $=$ et on fait précéder le tout de NON.

Exemple : de $||| \clubsuit ||||| = |||$, on déduit : NON $||| \clubsuit ||||| = |||$

– **règle D** : on ajoute deux fois NON devant une formule déjà obtenue.

Exemple : de $||| \clubsuit ||||| = |||$, on déduit : NON NON $||| \clubsuit ||||| = |||$

Une déduction (ou démonstration) dans le système $\clubsuit$ est une suite de formules telle que chacune est soit un axiome, soit provient de l'utilisation d'une des règles **A**, **B**, **C** ou **D** sur des formules précédemment déduites.

Les axiomes et les règles d'inférence doivent être suffisamment simples pour que la vérification qu'une suite de formules est une déduction correcte puisse se faire mécaniquement (c'est-à-dire par algorithme).

Exemple de déduction dans le système $\clubsuit$:

$| \clubsuit | = |$ (c'est un axiome)

$|| \clubsuit | = |$ (règle **B** appliquée à la formule précédente).

$|| \clubsuit | = |$ (règle **A** appliquée à la formule précédente)

$|| \clubsuit || = |$ (règle **B** appliquée à la formule précédente)

$|| \clubsuit |||| = |$ (règle **B** appliquée à la formule précédente)

NON $|| \clubsuit |||| = ||$ (règle **C** appliquée à la formule précédente)

Interprétation du système formel $\clubsuit$

Ce système formel permet de démontrer (i) toutes les propriétés vraies concernant le plus grand commun diviseur de deux nombres entiers du type : le pgcd de 6 et 4 est 2 (ce qui, avec nos notations, s'écrit $||||| \clubsuit |||| = ||$) ;

(ii) toutes les formules de ce type précédées d'un nombre quelconque de NON.

Le fait que nous ayons réussi à établir $|| \clubsuit |||| = |$ signifie en particulier que le pgcd de 2 et 5 est 1, autrement dit que 2 et 5 sont premiers entre eux. Ayant établi que NON $|| \clubsuit |||| = ||$, nous avons démontré que le pgcd de 2 et 5 n'est pas 2.

Les propriétés de ce système sont :

– correction vis-à-vis du domaine mathématique visé : tout ce qu'on démontre en suivant le système est juste ;

– adéquation vis-à-vis du domaine mathématique visé : tout ce qu'on peut formuler avec les formules du système et qui est vrai est démontrable ;

– consistance (résulte de l'adéquation) : jamais on ne prouve une formule et son contraire (la même formule précédée de NON) ;

– complétude : pour toute formule F du système, on peut démontrer F ou NON- F .

Ce système capte complètement le domaine mathématique visé, et son étude peut être menée entièrement (c'est rarement le cas). Il ne contient pas d'indécidables, mais, si on omettait un seul axiome (par exemple $|| \clubsuit || = ||$), certains énoncés vrais (exemple : $||| \clubsuit ||||| = ||$) deviendraient indécidables. Le système modifié serait alors incomplet.

– A l'infini, je dispose d'un système S_{infini} qui possède peut-être une infinité d'axiomes, mais qui est complet.

Ce système semble contredire le théorème de Gödel. Où est la faille de ce raisonnement?

Il est bien vrai qu'il n'y a plus d'indécidable pour S_{infini} : par construction, il ne peut y en avoir. Si au départ S était consistant, S_{infini} l'est aussi. En revanche, et c'est ce qui ne va pas, le prétendu système S_{infini} n'en est pas vraiment un, car il n'existe aucun moyen algorithmique de savoir si une formule donnée est un axiome ou n'en est pas un. Or pour qu'un système formel soit envisageable en mathématiques, il faut bien sûr qu'on sache en reconnaître les axiomes (on dit que le système doit être effectif). La prétendue méthode pour passer de S_n à S_{n+1} aboutit à une abstraction mathématique qui n'est pas utilisable comme système formel.

L'énoncé du premier théorème de Gödel en faisant apparaître cette précision (qu'on omet souvent pour simplifier l'exposé ou parce qu'on sous-entend le mot effectif dans la définition de système formel) est donc : tout système formel effectif permettant de faire de l'arithmétique est soit incomplet, soit inconsistant.

COMPLÉTUDE DE LA LOGIQUE

Mettons en parallèle le résultat d'incomplétude de Gödel avec un autre résultat de Gödel, de deux ans plus ancien et qui, lui, est positif. Il s'agit de la complétude de la logique. Ce résultat intéresse moins les philosophes, alors que pourtant c'est la comparaison des résultats de complétude et d'incomplétude qui contient les enseignements les plus précieux, et fait entrevoir les mystères les plus profonds sur la nature des mathématiques.

Au lieu de s'intéresser à ce qui est vrai des nombres entiers, on cherche à savoir ce qui est vrai sur le plan de la logique pure. On se pose des questions comme :

– est-il vrai que si $\{a$ implique $b\}$ alors $\{non-b$ implique $non-a\}$?

– est-il vrai que si $\{pour\ tout\ x, y : P(x,y)\}$ alors $\{pour\ tout\ z : P(z,z)\}$?

– est-il vrai que si $\{pour\ tout\ x, il\ existe\ y\ tel\ que : Q(x,y)\}$ alors $\{il\ existe\ y\ tel\ que\ pour\ tout\ x : Q(x,y)\}$?

(Réponses : oui, oui, non)

Nous cherchons ici un système formel pour ce que nous dénommons le calcul des prédicats du premier ordre qui est la logique générale où tout raisonnement mathématique peut s'exprimer.

Le résultat de Gödel de 1929 répond à cette question : il existe des systèmes formels qui démontrent toutes les formules justes du calcul des prédicats du premier

4. HERCULE CONTRE L'HYDRE

Une hydre possède une multitude de têtes reliées à son corps et organisées selon un réseau de cou reliés par des nœuds, le tout formant un arbre. Hercule doit tuer l'hydre en coupant toutes les têtes.



PREMIERE COUPURE

En brun, la partie excitée de l'hydre. La partie excitée est dupliquée.



DEUXIEME COUPURE

En brun, la partie excitée par la deuxième coupure. La partie excitée est ajoutée deux fois.



TROISIEME COUPURE

En brun, la partie excitée par la troisième coupure. La partie excitée est ajoutée trois fois. S'il coupe la tête bleue reliée directement au corps de l'hydre, elle ne repousse pas.



Coupera-t-on toutes les têtes de l'hydre? Cette affirmation, démontrable avec des théories puissantes, est un indécidable de l'arithmétique.

Hercule doit tuer l'hydre en ne coupant qu'une tête à la fois et en tranchant la dernière partie du cou située avant la tête coupée. Lorsqu'il coupe une tête et un cou, une multitude de nouveaux cou et têtes apparaissent : lorsqu'il vient de couper la n -ième tête et son cou, le cou en dessous de la partie qu'il vient de couper et tout l'ensemble des nœuds, cou et têtes au-dessus de ce nœud ("le bout excité de l'hydre") se reproduit en n exemplaires qui poussent à côté du bout excité. Toutefois, lorsque Hercule coupe un cou directement lié au corps de l'hydre, les têtes ne repoussent plus.

Hercule peut-il vaincre l'hydre en éliminant toutes les têtes? L'opération de coupe augmente beaucoup le nombre des têtes, mais diminue aussi le nombre de têtes associées à un cou relié au corps. Aussi espère-t-on arriver au moment où toutes les têtes sont directement liées au corps et où l'on peut les couper sans déclencher de reproduction. On démontre, avec des théories plus puissantes que l'arithmétique de Peano, que Hercule, avec n'importe quelle stratégie de choix de tête à couper, vient à bout de l'hydre en un temps fini, mais aussi que ce résultat est un indécidable de l'arithmétique de Peano.



5. PEANO, FERMAT ET GÖDEL

L'arithmétique de Peano est le système formel dans lequel on démontre les propriétés des nombres entiers comme «13 est un nombre premier», «l'équation $x^2 + y^2 = z^2$ possède une infinité de solutions», ou «tout nombre entier est la somme de quatre carrés». On définit l'arithmétique de Peano en indiquant les propriétés du nombre 0, de l'opération "est le successeur de", de l'addition, de la multiplication et, surtout, en précisant qu'on peut raisonner par récurrence pour toute formule arithmétique $P(n)$ (si

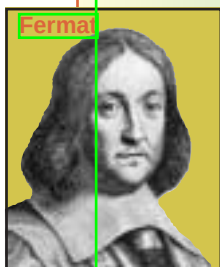
$P(0)$ est vrai et que pour toute valeur de n , $P(n)$ vrai implique $P(n+1)$ vrai, alors $P(n)$ est vrai pour tout n).

Le philosophe Daniel Isaacson soutient que toutes les propriétés purement arithmétiques sont démontrables dans le système de Peano qui, en un certain sens, serait donc complet. L'incomplétude (établie par les théorèmes de Gödel) ne serait en mesure que de faire apparaître des indécidables non purement arithmétiques obtenus soit par codage (comme les indécidables donnés par la démonstration de Gödel), soit artificiellement parce que provenant de concepts de haut niveau (de type ensembliste, par exemple).

Cette analyse est soutenue par les résultats des logiciens français P. Cegielski et O. Sudac, qui ont obtenu, pour certains résultats d'arithmétique pure, comme le théorème d'Hadarnard et de La Vallée Poussin, des démonstrations ne mettant en jeu que le système de Peano.

D'autres résultats (voir le problème d'Hercule et de l'hydre, illustré sur la figure 4) sont plus difficiles à concilier avec l'analyse de D. Isaacson. Aujourd'hui on ne sait pas ce qu'il en est du théorème de Fermat (démontré par Wiles en 1994), théorème qui est incontestablement un énoncé d'arithmétique pure et qu'on ne sait actuellement démontrer que dans des systèmes plus forts que l'arithmétique de Peano.

La réponse à cette question est importante pour comprendre en quel sens l'arithmétique de Peano est complète et garantirait la preuve d'Andrew Wiles. Elle ne reposerait plus implicitement, comme c'est le cas aujourd'hui, sur l'hypothèse de consistance de la théorie des ensembles (hypothèse jugée forte par beaucoup de mathématiciens et improuvable de manière satisfaisante, comme l'établit le second théorème d'incomplétude de Gödel).



ordre et uniquement elles (et on sait construire de tels systèmes). Nombre de logiciens jugent ce résultat aussi important que le résultat d'incomplétude. C'est l'un des triomphes de la logique moderne et il a étonné bien des philosophes qui croyaient impossible de cerner toute la logique et considéraient que l'opération de vérification des raisonnements mathématiques ne pouvait pas être pas mécanisée (possibilité qui est une conséquence du théorème de complétude).

La mise en parallèle des résultats positifs et négatifs de Gödel étonne : le domaine des vérités logiques abstraites est formalisable, alors que celui des vérités concernant les entiers ne l'est pas. Le domaine du raisonnement est accessible, celui des nombres ne l'est jamais entièrement : l'abstrait le plus pur et le plus général serait à notre portée, alors que le concret des nombres entiers serait par nature inépuisable et impossible à cerner, à moins, comme le soutiennent certains philosophes, que l'impression de clarté que nous avons concernant les entiers ne soit qu'une illusion, l'incomplétude étant un symptôme de l'irréalité de l'infini et

une mise en garde contre les utilisations imprudentes qu'on en fait.

Il ne fait aucun doute : les mathématiques sont concernées par l'incomplétude et l'indécidabilité. Toute la réflexion sur les mathématiques est hantée par les résultats de Kurt Gödel, comme l'ouvrage récent *The Philosophy of Mathematics* de W. Hart (Oxford University Press, 1996) l'illustre avec finesse. Savoir si d'autres domaines doivent en tenir compte est plus délicat et l'on peut en douter tant le manque de sérieux est la règle dans l'usage pratiqué hors des mathématiques des théorèmes d'incomplétude (qu'on préfère aux théorèmes de complétude, le plus souvent ignorés).

L'USAGE PHILOSOPHIQUE DE L'INCOMPLÉTUDE

Le texte suivant du philosophe Jacques Bouveresse, que je me permets de citer longuement, commente avec intelligence et justesse la situation.

«Lorsqu'un philosophe se met à parler de l'indécidabilité et du théorème de Gödel dans le cadre d'une réflexion sur le problème de la littérature et de l'analyse

de textes littéraires, on pourrait évidemment s'attendre à ce que ce soit pour introduire, si possible, un peu plus de précision dans la discussion de questions qui sont par nature imprécises. Mais c'est en réalité exactement l'inverse qui se passe, puisque le flou et l'imprécision de l'usage littéraire ont plutôt tendance à remonter immédiatement jusqu'aux notions techniques telles qu'elles se présentent initialement dans leur contexte d'origine, au point que l'on finit tout simplement par ne plus rien comprendre à ce qu'elles signifient. Le résultat le plus évident me semble être que rien d'intéressant n'a été ajouté par l'invocation du théorème de Gödel à ce que l'on peut dire sans lui à propos d'une question comme celle de l'indécidabilité dans le domaine de la littérature, de la métaphysique ou de la religion, mais que l'on a, en revanche, perdu toute chance d'avoir encore une idée précise de ce que Gödel a démontré exactement et des conséquences qui en résultent. [...] On peut remarquer que le théorème ne représente pas seulement, comme il se dit généralement, un échec, mais également un succès pour le formalisme lui-même, dont Gödel maîtrise et exploite toutes les ressources. Mais de cela, bien entendu, la plupart des philosophes qui cherchent à utiliser pour leurs propres fins le résultat de Gödel ne croient pas utile de savoir quoi que ce soit. [...] La recommandation que l'on peut formuler à l'usage de ceux qui ont des ambitions de cette sorte est la suivante : 1) Ne regardez surtout jamais la démonstration du théorème, ce qui serait pourtant le meilleur moyen de savoir ce qu'elle démontre au juste. Comme dit Wittgenstein, si vous voulez savoir ce qu'une démonstration démontre, regardez la démonstration. 2) Ne lisez aucun des nombreux commentaires sérieux et informés (mais il est vrai, malheureusement assez techniques) qui ont été écrits sur le genre de signification philosophique que l'on peut ou ne peut pas attribuer au théorème de Gödel. Car si vous le faisiez, vous risqueriez de découvrir immédiatement qu'il est impossible de l'utiliser de la façon à laquelle vous songiez et qui a l'avantage d'être considérée comme particulièrement philosophique. 3) Évitez aussi de regarder ce que Gödel a dit lui-même de la signification philosophique de son résultat et des extensions que l'on pourrait éventuellement songer à lui donner. [...] Une véritable mise en parallèle de la situation en logique et en sociologie par exemple consisterait à rechercher les emboîtements de systèmes, mais le plus souvent les utilisateurs de l'incomplétude ne peuvent faire cette mise en parallèle précise car ils croient fausement que les indécidables le sont absolument, ce qui est le contresens le plus grand qu'on puisse faire (mais aussi le plus

courant). [...] Même comme métaphore vague (qu'on pourrait remplacer par celle, géométrique et accessible à chacun, mais ce ne serait pas drôle, de sommets montagneux de plus en plus hauts) l'incomplétude des systèmes formels n'est pas comprise. On ne retient de Gödel que l'idée (fausse et passablement religieuse) de vérités qui échappent à la vue de ceux qui sont situés en un point théorique donné et qui par principe leur échapperont toujours, car le théorème dit qu'il en est ainsi! L'idée que celui qui évoque le théorème réalise un dépassement de tout cela est souvent implicite et produit sans doute l'effet (recherché) qu'il est au-dessus de la mêlée (pré-gödelienne), hors de portée d'une certaine façon des effets du théorème de Gödel (car comme en psychanalyse peut-être le fait de savoir est déjà le début de la guérison !)) (Jacques Bouveresse, *Qu'appelle-t-il penser?* Les cahiers rationalistes, septembre 1998 et novembre 1998).

LE THÉORÈME DE FERMAT EST-IL DÉMONTRÉ?

A l'inverse, l'importance au quotidien en mathématiques de l'incomplétude n'est pas toujours clairement perçue. Illustrons-la à propos du grand théorème de Fermat. Ce théorème est l'affirmation qu'il n'existe aucun quadruplet de nombres entiers x , y , z et n avec x , y et z positifs, et n supérieur à 2 tel que $x^n + y^n = z^n$. Il s'agit donc d'un énoncé d'arithmétique et l'on s'attend, s'il est vrai, à ce qu'il soit démontrable dans le système formel naturel de l'arithmétique, qui est l'arithmétique de Peano. Or la démonstration d'Andrew Wiles de 1994 utilise des moyens bien plus puissants et fait usage de la théorie des ensembles nommée théorie de Zermelo-Fraenkel. La question se pose donc : le théorème de Fermat peut-il être démontré dans l'arithmétique de Peano ou nécessite-t-il vraiment l'usage de toute la puissance de Zermelo-Fraenkel? Autrement dit, ce théorème est-il un indécidable de l'arithmétique de Peano?

Personne ne sait répondre aujourd'hui, mais des équipes de chercheurs s'occupent de cette question, en particulier en France où Patrick Cegielski et Olivier Sudac ont déjà obtenu des résultats très intéressants. Ils ont montré que le théorème de Dirichlet (qui indique que, dans toute progression arithmétique $an+b$, a et b premiers entre eux, il y a une infinité de nombres premiers) et le théorème de répartition des nombres premiers d'Hardamard et de La Vallée-Poussin (qui indique qu'il y a environ $n/\ln(n)$ nombres premiers inférieurs à n) étaient démontrables dans l'arithmétique de Peano. De tels résultats sur la décidabilité des énon-

cés d'arithmétique dans la théorie de Peano sont importants pour le mathématicien, car ils rendent plus sûres les démonstrations obtenues dans Zermelo-Fraenkel et les libèrent d'hypothèses implicites sur la réalité des ensembles.

En effet, la notion d'ensemble est beaucoup plus délicate que celle de nombre entier (la première permet d'ailleurs de retrouver la seconde), et l'assurance que nous avons que ces entités que nous appelons ensembles existent est bien moins grande que celle que nous avons que les entiers existent. D'ailleurs, face aux nombreux problèmes de la théorie des ensembles, des mathématiciens de très grand renom comme Brouwer, Borel, Lebesgue, Weil ou Poincaré ont exprimé des doutes concernant les ensembles ou même les ont complètement rejetés.

Pour eux, la preuve de Wiles ne serait pas complètement satisfaisante (ce qui ne signifie pas qu'ils la jugeraient inintéressante!). Une preuve du théorème de Fermat n'utilisant que l'arithmétique de Peano serait un soulagement, et si l'on devait découvrir qu'une telle preuve n'existe pas – que le théorème de Fermat est un indécidable de l'arithmétique de Peano –, ce serait une découverte encore plus importante, qui amènerait à reconsidérer l'arithmétique de Peano qu'on juge (sans preuve) comme suffisante pour tous les résultats d'arithmétique classique.

Un résultat de logique indique que, si l'on ajoute à l'arithmétique de Peano l'axiome affirmant que «la théorie des ensembles est consistante», alors, avec la preuve du théorème de Fermat de Wiles, on pourra en construire une dans l'arithmétique de Peano. Pour penser que le théorème de Fermat est vraiment démontré, il n'est donc pas nécessaire de croire à l'existence des ensembles, mais seulement à la consistance de la théorie Zermelo-Fraenkel, ce qui est beaucoup plus faible. Aujourd'hui, concernant le théorème de Fermat, trois attitudes sont donc possibles.

(a) Soit on fait confiance à l'évidence des ensembles (ils existent, et ce qu'on démontre avec eux est vrai sans qu'on ait rien à craindre), et alors la démonstration de Wiles prouve définitivement le théorème de Fermat.

(b) Soit on fait confiance seulement à la consistance du système formel Zermelo-Fraenkel, et alors la démonstration de Wiles est garantie par le fait qu'il existe une preuve du théorème de Fermat dans l'arithmétique de Peano qui utilise l'hypothèse de cette consistance. Croire en la consistance de Zermelo-Fraenkel sans croire aux ensembles peut se justifier en disant que, depuis bientôt un siècle qu'on utilise ZF, personne n'y

a trouvé de contradiction. Bien des mathématiciens sont tentés par cette position, qui leur évite l'engagement ontologique de croire aux ensembles, mais ils doivent se rendre compte que c'est là une position contraire à celle qu'on prend habituellement concernant les conjectures non démontrées : quand aucun contre-exemple n'a été découvert concernant une conjecture, on ne la considère pas pour autant comme vraie ; pourquoi alors considérer que Zermelo-Fraenkel ne donne jamais de contradiction du seul fait qu'on n'en a pas trouvé jusqu'à maintenant! L'indécidabilité des preuves de consistance que le second théorème de Gödel énonce ne signifie pas que tous les systèmes auxquels on s'intéresse sont consistants!

(c) Soit on considère qu'il reste des doutes concernant la consistance de Zermelo-Fraenkel, et alors on doit aussi douter du théorème de Fermat, et donc en rechercher une preuve dans des systèmes plus faibles que Zermelo-Fraenkel, ou démontrer qu'il s'agit d'un indécidable de l'arithmétique.

Le nombre premier de deux millions de chiffres évoqué dans le dernier article ne valait pas 50 000 \$ mais rien du tout. En effet une malheureuse erreur typographique, qui, par les vertus du copier-coller, s'est répandue en quatre exemplaires dans l'article, a changé un "6" en "8". Le nombre premier gagnant a l'exposant 6 972 593 et non pas 8 972 593. Nous présentons toutes nos excuses aux lecteurs que cette erreur a pu gêner.

Patrick CEGIELSKI, Quelques contributions à l'étude des arithmétiques faibles, Thèse de doctorat d'État, Université de Paris VII, 1990.

J.-P. DELAHAYE, Arguments et indices dans le débat sur le réalisme mathématique, in L'Objectivité mathématique, Platonisme et structures formelles, pp. 23-48, Masson, 1995.

L. KIRBY et J. PARIS, Accessible Independence Results for Peano Arithmetics, in Bull. London Math. Soc., vol. 14, pp. 285-293, 1982.

R. SMULLYAN, Les théorèmes d'incomplétude de Gödel, Masson, 1993.

O. SUDAC, Étude de la prouvabilité de certains résultats classiques dans l'arithmétique primitive récursive et l'arithmétique de Peano, Thèse de doctorat, 1998.

D. VALLEMAN, Fermat's Last Theorem and Hilbert Program, in The Mathematical Intelligencer, vol. 19, n° 1, pp. 64-67, 1997.

Cosmologie

théories du ciel

Michel Cassé. Éditions Payot, 1999 (210 pages, 95 francs).

Fronde de l'auteur et signe des temps, *théories du ciel* rompt pour notre plus grand plaisir avec la vaste tradition de vulgarisation du Big Bang. En cet exercice de style, le titre en minuscules, ironiquement pompeux et justement pluriel, nous prépare dès le départ au déboulonnage du «Big». Le «Bang», lui aussi, se fait tout petit lorsqu'on nous explique qu'un son, aussi furieux soit-il, nécessite un espace – évidemment absent en cette origine du Tout – pour se propager. «L'émergence est silencieuse.» Tel le fier Guido Riccio da Fogliano qui orne la couverture, Michel Cassé parcourt son domaine en chevauchant ses passions. Et nous chevauchons avec lui, avec tous les hommes qui écrivent depuis toujours les «grands récits» des origines.

Bien sûr, le destrier est soigneusement corseté par la raison, le bâton de maréchal imprimant une profonde dignité au pas d'amble de l'équipage. Peu importe, le parti est net et franc : la cosmologie, c'est avant tout de la poésie. «Le lieu d'où parle n'importe quel cosmologiste, c'est son espace-temps culturel.» La relativité des théories et l'universalité du rêve font bon ménage en cette promenade autour du firmament.

Comment en sommes-nous arrivés là? Jadis la science était mieux rangée! En 1965, par exemple, Arno Penzias et John Wilson comprirent que les parasites de leur antenne micro-ondes, injustement attribués à un couple de pigeons nichant sur ladite antenne, étaient bel et bien le reflet à l'horizon de la naissance de l'Univers. Des mesures soigneuses confirmèrent qu'il s'agissait précisément du rayonnement fossile prévu par le modèle du Big Bang. Les cosmologies du type Big Bang entraient alors dans un âge d'or qui semble s'enfuir aujourd'hui.

A-t-on reculé depuis lors? Non, au contraire : les observations sont maintenant si nombreuses et si précises, mais aussi si diverses et si singulières, qu'elles encombrant nos descriptions théoriques d'une immense famille de fossiles hétéroclites. Il est de plus en plus difficile d'offrir un rôle à chaque acteur au théâtre de l'évolution universelle. Le casting ne se passerait

pour pas si mal s'il n'y manquait une cantatrice chauve, grande absente sans laquelle le récit actuel ne tiendrait pas : la matière noire, encore inconnue, qui pourrait peser jusqu'à dix fois autant que la matière lumineuse observée dans le ciel. Sans compter ce commandeur qui revient demander des comptes sur la «quintessence», nom récemment associé à la constante cosmologique, en référence aux premiers schémas platoniciens. Ce revenant, vous l'avez reconnu : il s'agit de l'éther, paré de ses nouveaux habits de vide quantique. En matière de vide, M. Cassé, déjà auteur de *Du vide et de la création* en 1993, est intarissable et nous régale de phrases splendides.

Mythes que tout cela? Mythes intercesseurs, nécessaires pour communiquer la «réalité inimaginable des physiciens aux non-physiciens», comme le suggère une citation de Claude Lévi-Strauss? Ou «mythologie du xx^e siècle» telle que «sera peut-être considérée notre théorie dans mille ans», tandis qu'«elle est encore dans les jours lumineux de son enfance et croit en sa pleine vérité»? Les métaphores colorées fleurissent ce texte comme autant d'étoiles à découvrir le long de la Voie lactée. Leur sel scientifique échappera souvent aux non-physiciens, mais tous, lecteurs physiciens et non-physiciens, prendront un profond plaisir à parcourir cette langue céleste.

Michel LAGUÈS

Histoire des sciences

Louis Jurine, chirurgien et naturaliste (1751-1819)

Sous la direction de René Sigrist, Vincent Barras et Marc Ratcliff. Georg Éditeur, 1999 (494 pages, 50 francs suisses).

Il était difficile, pour un chirurgien du siècle des Lumières, de prétendre à une quelconque ascension sociale : ces praticiens, qui étaient également barbiers, se formaient par apprentissage, puis, munis de bons certificats, ils présentaient une maîtrise devant la Faculté. À cette occasion, ils devaient accomplir deux «chefs-d'œuvre» : une démonstration sur un cadavre et une intervention sur le vivant.

Alors ils avaient le droit d'ouvrir boutique et d'exercer leur art : «barberie», saignées, incisions d'abcès, traitements des blessures ou des maladies vénériennes... Autrement dit, un barbier chirurgien était considéré comme inférieur au médecin, bourgeois, cultivé, homme de science.

Dans ce contexte très codifié, le destin de Louis Jurine (1751-1819) apparaît comme particulièrement exceptionnel. Ce fils d'artisan guimpier (fabricant de galons et d'épaulettes), d'origine lyonnaise, était «natif de Genève» et n'en deviendra citoyen à part entière qu'en 1776. Pourtant il réussira une remarquable carrière médicale qui dépassera le cadre genevois, et il effectuera des recherches dans des domaines variés de l'histoire naturelle (botanique, entomologie, ornithologie, mammalogie, ichtyologie...). À ce double titre, sa renommée sera européenne.

Comment expliquer un tel parcours? En 1773, il devient maître en chirurgie. L'année suivante, son mariage lui assure une fortune confortable. En peu d'années, sa renommée de chirurgien est établie, et il est considéré comme «ayant la réputation du plus habile médecin d'une ville qui a toujours compté dans son sein plusieurs médecins habiles». Il assoit sa réputation par l'obtention de prix prestigieux, dont trois médailles de la Société de médecine de Paris pour le *Mémoire eudiométrique sur les gaz du corps humain* (1787), le *Mémoire sur l'allaitement artificiel* (1788) et le *Mémoire sur l'angine de poitrine* (1813) ; en 1812, il reçoit aussi le grand prix impérial pour son travail sur le «croup» (l'apparition de membranes dans le larynx, chez les personnes atteintes de diphtérie).

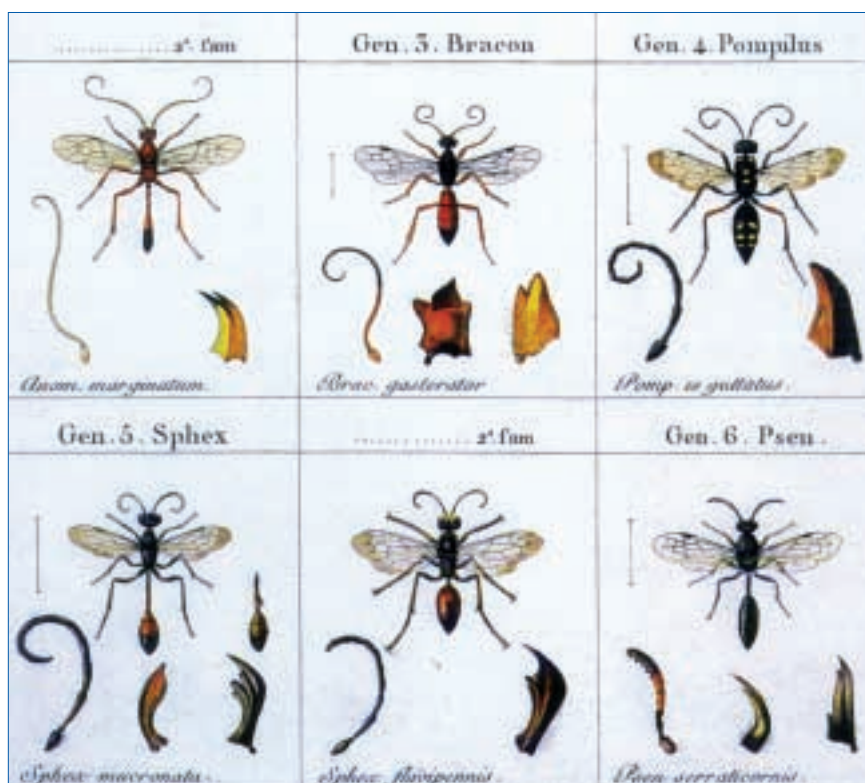
Sa carrière semble bien remplie : consultations dans sa boutique, à l'hôpital, et grosse clientèle privée, de plus en plus mondaine. Il est le médecin traitant de Friederike Brun, femme de lettres danoise qui dit de lui en 1802 : «Les étincelles de son esprit brillent de quelque côté qu'on frappe.» Et, en 1812, il assiste l'accouchement (dans le plus grand secret) de Mme de Staël. Jurine n'est pas seulement obstétricien, ses interventions sont ophtalmologiques, urologiques ou digestives, sans oublier les amputations (il ampute le naturaliste genevois Jean Senebier du bras gauche, pour une maladie des os de l'avant-bras et de la main). Enfin il assure des fonctions médico-légales : «visites» de cadavres, autopsies, examens d'enfants «exposés» (c'est-à-dire abandonnés).

Même s'il fait «le nécessaire pour remplir convenablement son état et ses

devoirs», Jurine regrette de ne pas être assez riche pour se consacrer entièrement à l'histoire naturelle. Il se cultive et reconnaît des maîtres, parmi lesquels Carl von Linné, Horace Bénédict de Saussure, Charles Bonnet ou Johann Christian Fabricius. Pourtant son souhait est de ne pas s'instruire en «perroquet» et de se passer de ses premiers guides. Après la constitution d'un herbier, il collectionne les minéraux, les insectes, les oiseaux, et il dispose bientôt du plus beau cabinet d'histoire naturelle de Genève, reflet de son amour de la nature, dont l'observation est «le chemin du bonheur».

Dès 1790, Jurine est très actif dans les sociétés savantes, où il présente les richesses du patrimoine naturaliste genevois. Il y fréquente l'élite scientifique et noue des relations avec les savants européens : c'est l'époque d'une large diffusion de la science. Il anime la Société d'histoire naturelle, qui deviendra la Société de physique et d'histoire naturelle, fréquente assidûment la Société des naturalistes genevois, et sera correspondant ou membre associé de nombreuses sociétés ou académies scientifiques ou médicales.

Jurine, comme tous les collectionneurs du XVIII^e siècle, souhaite classer ses échantillons au mieux, mais les systèmes de l'époque sont bien imparfaits. Concernant l'«insectologie», il a le choix entre le système linnéen, fondé sur le nombre, la forme et la texture des ailes, et celui de Fabricius, qui considère les organes de la manducation, avec, notamment, les palpes maxillaires et labiaux (système palpiforme). Il opte finalement pour des systèmes différents quand il classe les coléoptères (hannetons, scarabées, charançons...) et les lépidoptères (papillons), avant de proposer une *Nouvelle méthode de classer les Hyménoptères et les Diptères*, en 1807. Il veut corriger la «foule d'erreurs» du système palpiforme et définir des caractères plus «apparens», plus «certains», bien tranchés et applicables aux individus de toutes tailles, même les plus petits. Le but est de proposer une identification aisée, invariable et sans dissection délicate. À cette fin, il introduit un premier caractère principal, d'après les nervures des ailes, qui forment des «cellules» radiales, cubitales et brachiales. Ce repère est suffisant pour définir le genre, mais on peut compléter avec d'autres caractères principaux, qui utilisent les mandibules et les antennes, soit pour surmonter une difficulté d'utilisation du premier caractère, soit pour y suppléer en cas d'absence, soit pour subdiviser un groupe. Enfin, il n'hésite



Une planche dessinée par Louis Jurine.

pas à recourir à des caractères accessoires, telles la forme du corselet ou son attache sur l'abdomen.

Jurine privilégie toujours les caractères externes et veut ignorer les développements de l'anatomie comparée. Malgré les apparences, cette classification demeure artificielle. Il s'agit d'un inventaire strict de la création, avec un besoin impérieux d'établir une systématique stable et incontestable. C'est le systématicien qui choisit les caractères. Jurine, fortement influencé par Bonnet, conçoit la série des animaux comme une chaîne continue, marquée par des chaînons de transition. Même s'il reconnaît, avec Senebier, l'utilité de l'anatomie, de la physiologie et de l'écologie, il ne partage pas avec lui son penchant pour une classification naturelle, où le systématicien est respectueux de l'ordre de la nature, des rapports entre les êtres et de leur organisation. Les deux conceptions sont différentes, la première considérée comme une étape de la seconde, en attendant d'en savoir plus sur les «êtres naturels».

Jurine est également remarquable par ses expérimentations. Au moment où le vol des chauves-souris intrigue les savants, Lazzaro Spallanzani (1729-1799) découvre que, même aveuglés, ces animaux volent en évitant les obstacles. Outre la vue, il a testé le toucher, l'ouïe, l'odorat et, même, le goût, et il évoque un sixième sens encore

inconnu. A partir de l'étude de Spallanzani, Jurine expérimente avec des chauves-souris aveuglées, qui évitent les pièges. Puis il bouche le conduit auditif des animaux, et va même jusqu'à leur percer le tympan : il se convainc alors que l'ouïe est le sens utilisé et marque ainsi une étape dans l'histoire de l'écholocation. Spallanzani se rallie à ses conclusions, mais l'entourage scientifique de Jurine (dont Senebier et Saussure) bloque la publication des résultats. Georges Cuvier ignorera tout de l'interprétation approuvée par Spallanzani, mais s'indignera de la cruauté de Jurine.

L'abondance et la variété des recherches de Jurine en disent long sur son insatiable curiosité et sur ses compétences. Observateur soucieux d'exactitude, vérificateur inlassable, homme cultivé, il s'inscrit dans la pure tradition des Lumières. Il est plus compilateur que théoricien, et une trop grande dispersion l'a peut-être empêché d'avoir un rôle plus éminent en médecine ou en histoire naturelle. Il avait toutes les qualités nécessaires.

Terminons en signalant la grande valeur éditoriale du volume sur Jurine aujourd'hui publié. La récente collection «Bibliothèque d'histoire des sciences» signe ici un ouvrage remarquablement documenté, d'une grande finesse d'analyse et d'une parfaite lisibilité.

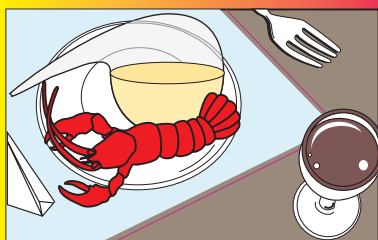
Michèle FEBVRE

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 15 heures 41,
17 heures 10,
20 heures 12,
22 heures 12,
et 23 heures 42



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 29 novembre 1999.

FRANCE

info

Sciences humaines

Introduction aux études littéraires assistées par ordinateur

Michel Bernard. Presses Universitaires de France, 224 pages, 158 francs.

Les études littéraires examinées dans cette «Introduction» se limitent aux plus élémentaires de celles qui sont assistées par ordinateur. Les textes sont d'abord considérés sous leur forme informatique (comment se les procurer, comment les saisir...) ; puis Michel Bernard envisage les analyses que l'ordinateur peut leur faire aisément subir (mesures du nombre d'occurrences, fréquences...) ; enfin 50 pages de références mettent le lecteur sur des pistes lancées dans le livre.

Au total, l'ensemble est étonnant de simplicité. La méthode proposée ici ne fait qu'effleurer le quantitatif, mais quel gouffre entre les habituelles introductions à la mécanique quantique ou à la thermodynamique et cette introduction aux études littéraires ! Ici, la règle de trois est le bagage formel le plus complexe qui soit imposé au lecteur. Les règles de Zipf (par exemple, le produit de la fréquence par le nombre de formes ayant cette fréquence est quasi constant) sont les lois la plus avancées que l'on rencontre, surpassées seulement par l'analyse factorielle des correspondances, laquelle est d'ailleurs si rapidement évoquée qu'elle ne semble là que pour la forme. Tout est fait sur l'exemple. L'ouvrage, de ce point de vue, ressemble à ces cours de mathématiques, naguère à la mode, qui se déclinaient pour les différents DEUG : «L'algèbre linéaire pour les biologistes», «L'algèbre linéaire pour les économistes», «L'algèbre linéaire pour les études médicales»... : des rudiments exposés sur des exemples propres à la matière enseignée.

L'ensemble donne une idée étonnante de la discipline. Certes la langue et la littérature sont pleines de subtilités qui se codifient difficilement par les méthodes numériques, mais à redouter la tempête, on ne l'évite pas. Tandis que certains se méfient, d'autres (pensons, par exemple, aux émanations de l'Oulipo ou aux équipes qui entourent des chercheurs comme Maurice Gross, à l'Uni-

versité Paris VI) progressent et vont jusqu'à créer des romans assistés par ordinateur. On espère que l'auteur se réserve pour un autre ouvrage une analyse littéraire qui suivrait la comptabilité à peine améliorée qui est évoquée ici. Mais quelle analyse littéraire, au juste ? Et selon quelle méthode ? La réponse n'est pas donnée.

Il est d'ailleurs étonnant que l'ouvrage se limite à signaler les logiciels tout faits, pour cette analyse littéraire. Les littéraires peuvent-ils vraiment faire l'économie d'une maîtrise de l'outil informatique ? Je note cette phrase étonnante : «Les macros se révèlent parfois insuffisantes pour opérer des traitements plus ambitieux. En particulier, elles sont très lentes à l'exécution, et l'on ne peut envisager de les utiliser pour des tâches complexes. Dans ces cas-là, il faudra faire appel aux ressources d'un langage de programmation professionnel (C, Pascal, Basic...). Il ne faut pas s'exagérer les difficultés de l'apprentissage de ces outils, qui sont de plus en plus simples à utiliser pour le néophyte, surtout si l'on ne se propose que l'écriture de courts utilitaires («moulinettes») adaptés à ses besoins. En revanche, ils imposent d'entrer dans une logique très stricte qui rebute souvent les littéraires, habitués à plus de nuances. Il s'agit pourtant là d'une discipline de l'esprit qui ne manque pas d'intérêt, et l'on peut même penser que des spécialistes des langues naturelles ne sont pas moins bien armés que des mathématiciens pour manier un langage de programmation. Pour des programmes encore plus ambitieux, il vaudra mieux faire appel aux informaticiens professionnels.»

Étonnante déclaration ! Les littéraires seraient les maîtres du langage, et tout ce qui s'apparente à un langage serait de leur ressort : la chimie, donc, puisque c'est un langage (celui des molécules) ; les mathématiques, aussi, puisque le formalisme est un langage ; et pourquoi pas la physique, qui a son propre langage, celui des mathématiques selon Galilée.

D'autre part, on s'étonne de voir Basic considéré comme un langage de professionnels : lorsque Basic fut créé, il y a plus de 20 ans, on visait surtout les enfants des Collèges... qui devaient faire des programmes simples. Enfin, la dernière phrase mérite un débat : des professionnels de la littérature pourront-ils vraiment faire l'économie de la programmation s'ils veulent se livrer à des analyses modernes des textes littéraires ? Pourront-ils vraiment se décharger de leur travail sur des informaticiens ? Ne risquent-ils pas, ainsi, de susciter l'émergence d'une discipline d'«informatique littéraire» qui les supplantera ?

Jean Richter

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06

Tél : 01-55-42-84-00

<http://www.pourlascience.com>

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Hervé This (Rédacteur en chef), Françoise Cinotti (Rédactrice en chef adjointe), Bénédicte Leclercq (Rédactrice en chef adjointe), Yann Esnault, Philippe Pajot, Loïc Mangin (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Site Internet : Cyril Lamotte. Marketing : Stéphane Montouchet, assisté de Séverine Merviel et Marie Hubert. Direction financière : Anne Gusdorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Géraldine Le Coz. Presse et communication : Sylvie Gillet, assistée de Lucie Romier. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Ronan Allain, Leila Bellon, Bernard Bussel, Jacques Coutant, Costantino Creton, Paul Decaia, Évelyne Host-Platret, Claudine Lehman, Valérie Martin-Rolland, Robert Mochkovitch, Fabrice Murat, Claude Olivier, Reynald Pain, Guy Paulus, Christophe Pichon, Trần Quang Hai, Anne Servant.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Mark Alpert, Timothy Beardsley, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Alden Hayashi, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Chairman Emeritus : John Hanley. Chairman : Rolf Grisebach. President and Chief Executive Officer : Joachim Rossler. Vice-President : Frances Newburg.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28
Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Grémillon : 01 55 42 84 04.

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Marie Hubert.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Servidis : Chemin des châteaux, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oeis - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.» En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).

Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B, ainsi qu'un encart publicitaire INRA en pages centrales.



Colonie de pucerons noirs *Aphis fabae* se gorgeant de la sève d'une plante.

Entomologie

Les pucerons des plantes maraîchères (cycles biologiques et activités de vol)

Maurice Hullé, Évelyne Turpeau-aïlghil, Yvon Robert et Yves Monnet. Éditions INRA et ACTA, 1999.

Les pucerons des plantes cultivées, I. Grandes cultures

François Leclant. Éditions INRA et ACTA, 1999.

Pucerons pour tous, ou Aphides pour les initiés, ces noms évoquent, chez ceux qui cultivent les plantes, en amateurs ou en professionnels, de petits insectes souvent groupés en denses colonies sous les feuilles, ou formant des manchons sur les rameaux.

Ces suceurs de sève ont un cycle évolutif complexe, caractérisé notamment par une période de reproduction sans fécondation. Cette parthénogenèse, découverte dès le XVIII^e siècle par l'entomologiste suisse Charles Bonnet, est due à des femelles vivipares qui peuvent donner naissance à plusieurs générations durant l'été. D'où la prolifération des pucerons qui désolent les jardiniers.

L'Institut national de la recherche agromonomique (INRA) et l'Association des chambres techniques d'agriculture (ACTA) viennent de publier deux petits fasci-

cules dans la droite ligne de celui qui a été édité précédemment (*Les pucerons des arbres fruitiers, cycles biologiques et activités de vol*, par M. Hullé, E. Turpeau, F. Leclant et M.J. Rahm, 1998), fondé sur les données recueillies par le réseau Agraphid : installé en divers points du territoire, ce réseau permet de mieux suivre l'importance des migrations et de détecter de nouveaux ravageurs.

Le premier livre est consacré aux pucerons des plantes maraîchères, où sont examinés une vingtaine de légumes couramment cultivés en France. Ils sont présentés par famille botanique, avec les principales régions de production et la liste des pucerons qui les attaquent. Pour une trentaine d'espèces, les données biologiques essentielles sont indiquées, ainsi que leur activité de vol. Des tableaux synthétiques (principaux virus, les pucerons et leurs plantes hôtes, description des pucerons et principaux dégâts) concluent l'ouvrage.

L'identification des pucerons est difficile et demande des informations élémentaires qui sont regroupées par François Leclant sous forme de clefs pour ceux des grandes cultures : betterave, pomme de terre et tabac, graminées, oléagineux, fabacées. C'est le premier volume d'une série consacrée à toutes les cultures (le deuxième vient de paraître sous le titre *Les pucerons des plantes cultivées. II Les plantes maraîchères*). De nouveaux outils pour combattre ces ravageurs.

Jacques d'AGUILAR

La liste de tous les livres reçus en service de presse par la rédaction de *Pour la Science* est donnée sur notre site Internet, à l'adresse : <http://www.pourlascience.com>